

**Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos que permite predecir fallas mecánicas en los motores mediante el estudio de sus vibraciones.**

Jorge Eliecer Castaño Mejía

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Bogotá – Colombia

2021

**Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos que permite predecir fallas mecánicas en los motores mediante el estudio de sus vibraciones.**

Jorge Eliecer Castaño Mejía

Director:

Ing. Jairo Luis Gutiérrez Torres

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Bogotá – Colombia

2021

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

**Firma jurado 1**

---

**Firma jurado 2**

### **Declaración de derechos de propiedad intelectual**

Los autores de la presente propuesta manifestamos que conocemos el contenido del Acuerdo 06 de 2008, Estatuto de Propiedad Intelectual de la UNAD, Artículo 39 referente a la cesión voluntaria y libre de los derechos de propiedad intelectual de los productos generados a partir de la presente propuesta. Asimismo, conocemos el contenido del Artículo 40 del mismo Acuerdo, relacionado con la autorización de uso del trabajo para fines de consulta y mención en los catálogos bibliográficos de la UNAD.

## **Dedicatoria**

Este trabajo es fruto de mi esfuerzo y dedicación, así como mi pasión por la ingeniería y va dedicado a mi amada familia, la cual me ha apoyado y ha estado en cada momento de este proceso, ellos son mi motivación y el motor que da impulso a mi vida.

Mi dedicatoria está dirigida también para todas aquellas personas que han encontrado en la ciencia su pasión, buscando el bienestar de la humanidad convirtiendo este mundo en un lugar mejor para vivir.

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por darme vida y salud para surcar esta gratificante etapa de mi vida y un agradecimiento muy especial para la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD por brindar oportunidades a las personas que desean superarse y conseguir un título profesional, a todos aquellos tutores que me motivaron a no rendirme y me transmitieron su valioso conocimiento.

A todos ellos gracias...

## **Resumen**

En el presente proyecto se desarrolló un sistema que detecta de manera predictiva fallas en máquinas rotativas a través del desarrollo e implementación de diferentes tipos de sensores que permiten identificar de manera eficiente la mejor forma de adquirir señales que permitan detectar estas fallas.

Mediante el uso de acelerómetro, sensor de temperatura, sensor piezoeléctrico, micrófono y un sistema de adquisición de datos, se realizó un análisis de vibraciones en máquinas rotativas DC prediciendo posibles fallas a causa de anomalías mecánicas identificando las frecuencias involucradas, estas medidas pueden ser visualizadas en tiempo real.

Se desarrollo un software basado en LabVIEW 2019 que permite la adquisición y visualización de los datos, así como también el control del motor

Se plantearon diferentes escenarios en los que se realizaron comparativos de las señales adquiridas por cada sensor y así mismo como fue comportamiento identificando frecuencias en cada escenario.

Se plantea la implementación de este sistema como una plataforma educativa donde los estudiantes podrán llevar a cabo practicas presenciales en materias como Software para ingeniería, software avanzado para ingeniería, electrónica digital, control análogo y procesamiento digital de señales.

Palabras clave: Vibración, FPGA, muestreo, acelerómetro, piezoeléctrico, análisis, adquisición de datos, electrónica, mantenimiento predictivo, LabVIEW, maquinas rotativas.

## **Abstract**

In this project, a system was developed that predictively detects failures in rotating machines through the development and implementation of different types of sensors that allow to efficiently identify the best way to acquire signals to detect these failures.

Through the use of an accelerometer, temperature sensor, piezoelectric sensor, microphone and a data acquisition system, a vibration analysis was performed in DC rotating machines, predicting possible failures due to mechanical anomalies, identifying the frequencies involved, these measurements can be visualized in real time.

A software based on LabVIEW 2019 was developed that allows the acquisition and visualization of the data, as well as the control of the motor

Different scenarios were proposed in which comparisons of the signals acquired by each sensor were made, as well as the behavior identifying frequencies in each scenario.

The implementation of this system is proposed as an educational platform where students can carry out face-to-face practices in subjects such as Engineering Software, advanced engineering software, digital electronics, analog control and digital signal processing.

**Keywords:** Vibration, FPGA, sampling, accelerometer, piezoelectric, analysis, data acquisition, electronics, predictive maintenance, LabVIEW, rotating machines.



## Contenido

Introducción .....	18
Objetivos .....	20
Objetivo General....	20
Objetivos Específicos.....	20
Definición del problema .....	21
Justificación .....	23
Marco Referencial.....	25
Mantenimiento Predictivo.....	25
Aspectos Básicos de un Mantenimiento Predictivo.....	26
Vibraciones .....	29
Movimiento Armónico Simple .....	29
Análisis de Frecuencia .....	30
Diseño .....	33
Descripción de los Componentes.....	33
NI myRIO – 1900 .....	33
Breadborad Adapter for NI MyRIO.....	34
Puente H L298N .....	34
Acelerómetro y Giroscopio MPU-6050.....	35

	10
Motor DC .....	35
Módulo Convertidor de Señal Transmisor de Voltaje HW-685 .....	36
Modulo Elevador DC – DC Xl6009E1 .....	37
Transmisor de Temperatura RTD – PT100 .....	37
PT100 – WZP .....	38
Modulo Pulsador Táctil TTP223 .....	39
Sensor de Vibración Piezoeléctrico .....	39
Micrófono .....	40
Diseño del Circuito .....	41
Control de Motor.....	42
Sensórica .....	43
Hélices de Prueba.....	44
Diseño del software.....	45
Panel frontal: .....	45
Control del Motor: .....	46
Indicador de Temperatura y STOP .....	46
Bloque Acelerómetro Externo MPU-6050 .....	47
Bloque Acelerómetro MyRIO.....	48
Bloque Sensor Piezoeléctrico .....	49
Bloque Micrófono .....	49

	11
Diagrama de Bloques:.....	50
Programación Principal (Main VI) .....	50
Bloques de Programación secundarios (Sub VI) .....	50
Control de Temperatura: .....	51
Control del Motor: .....	51
Acelerómetro MyRIO .....	52
Sensor de Vibración Piezoeléctrico: .....	52
Micrófono .....	53
Acelerómetro Externo MPU-6050 .....	53
Pruebas del Sistema .....	54
Vibraciones sin Hélices, solo motor .....	55
Acelerómetro Externo MPU-6050 .....	55
Acelerómetro MyRIO .....	56
Sensor de Vibración Piezoeléctrico .....	57
Micrófono .....	57
Resumen.....	58
Vibraciones Hélice en buen estado: .....	59
Acelerómetro Externo MPU-6050 .....	59
Acelerómetro MyRIO .....	60
Sensor de Vibración Piezoeléctrico .....	61

Micrófono .....	61
Resumen.....	62
Vibraciones Hélice Fisurada: .....	63
Acelerómetro Externo MPU-6050 .....	63
Acelerómetro MyRIO .....	64
Sensor de vibración piezoeléctrico .....	65
Micrófono .....	65
Resumen.....	66
Vibraciones hélice sin un aspa: .....	67
Acelerómetro Externo MPU-6050 .....	67
Acelerómetro MyRIO .....	68
Sensor de Vibración Piezoeléctrico .....	69
Micrófono .....	69
Resumen.....	70
Análisis de Resultados .....	71
Acelerómetro Externo MPU-6050 .....	71
Acelerómetro MyRIO .....	73
Sensor de vibración piezoeléctrico .....	75
Micrófono .....	77
Conclusiones .....	79

Bibliografía .....	80
--------------------	----

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Oscilación de un resorte.....	30
Ilustración 2. Frecuencia vs tiempo .....	31
Ilustración 3. Frecuencia vs tiempo en motores.....	32
Ilustración 4. MyRIO .....	33
Ilustración 5. Breadboard adapter for NI MyRIO.....	34
Ilustración 6. Puente H L298N .....	34
Ilustración 7. Acelerómetro y giroscopio MPU-6050.....	35
Ilustración 8. Motor DC .....	36
Ilustración 9. Módulo convertidor de señal transmisor de voltaje HW-685.....	36
Ilustración 10. Modulo Elevador DC – DC Xl6009E1 .....	37
Ilustración 11. Transmisor de temperatura RTD – PT100.....	37
Ilustración 12. PT100 – WZP .....	38
Ilustración 13. Modulo pulsador táctil TTP223 .....	39
Ilustración 14. Sensor de vibración piezoeléctrico .....	39
Ilustración 15. Circuito analizador de vibraciones .....	41
Ilustración 16. Esquemático circuito sistema de potencia .....	42
Ilustración 17. Esquemático circuitos sensores e instrumentación.....	43
Ilustración 18. Hélices de prueba.....	44
Ilustración 19. Hélice en correcto estado .....	44

Ilustración 20. Hélice fisurada en una de sus aspas .....	44
Ilustración 21. Hélice sin un aspa .....	44
Ilustración 22. Panel frontal del programa.....	45
Ilustración 23. Control del motor en panel frontal.....	46
Ilustración 24. Indicador de temperatura en panel frontal .....	46
Ilustración 25. Bloque Acelerómetro Externo MPU-6050 en panel frontal .....	47
Ilustración 26. Bloque Acelerómetro MyRIO en panel frontal .....	48
Ilustración 27. Bloque Sensor Piezoeléctrico en panel frontal .....	49
Ilustración 28. Bloque Micrófono en panel frontal.....	49
Ilustración 29. Programación principal (Main VI) en Diagrama de bloques.....	50
Ilustración 30. Control de motor diagrama de bloques (SubVI).....	50
Ilustración 31. Control de temperatura diagrama de bloques .....	51
Ilustración 32. SubVI Control de motor .....	51
Ilustración 33. Adquisición de datos acelerómetro MyRIO diagrama de bloques .....	52
Ilustración 34. Adquisición de datos sensor piezoeléctrico .....	52
Ilustración 35. Adquisición de datos micrófono diagrama de bloques .....	53
Ilustración 36. Adquisición de datos por i2C sensor MPU-6050 diagrama de bloques .....	53
Ilustración 37. FFT MPU-6050.....	53
Ilustración 38. Configuraciones variables del motor .....	54
Ilustración 39. Vibraciones sin Hélices, solo motor (acelerómetro MPU-6050).....	55

Ilustración 40. Vibraciones sin Hélices, solo motor (acelerómetro MyRIO) .....	56
Ilustración 41. Vibraciones sin Hélices, solo motor (acelerómetro piezoeléctrico) .....	57
Ilustración 42. Vibraciones sin Hélices, solo motor (Micrófono) .....	57
Ilustración 43. Vibraciones Hélice en buen estado (acelerómetro MPU-6050) .....	59
Ilustración 44. Vibraciones Hélice en buen estado (acelerómetro MyRIO) .....	60
Ilustración 45. Vibraciones Hélice en buen estado (sensor piezoeléctrico).....	61
Ilustración 46. Vibraciones Hélice en buen estado (Micrófono) .....	61
Ilustración 47. Vibraciones hélice fisurada (acelerómetro MPU-6050) .....	63
Ilustración 48. Vibraciones hélice fisurada (acelerómetro MyRIO).....	64
Ilustración 49. Vibraciones hélice fisurada (sensor piezoeléctrico) .....	65
Ilustración 50. Vibraciones hélice fisurada (Micrófono).....	65
Ilustración 51. Vibraciones Hélice sin un aspa (acelerómetro MPU-6050) .....	67
Ilustración 52. Vibraciones Hélice sin un aspa (acelerómetro MyRIO).....	68
Ilustración 53. Vibraciones Hélice sin un aspa (sensor piezoeléctrico).....	69
Ilustración 54. Vibraciones Hélice sin un aspa (Micrófono) .....	69



## Índice de tablas

Tabla 1. Resumen vibraciones sin Hélice .....	58
Tabla 2. Resumen vibraciones con Hélice en buen estado .....	62
Tabla 3. Resumen vibraciones con Hélice fisurada .....	66
Tabla 4. Resumen vibraciones con Hélice sin un aspa .....	70
Tabla 5. Análisis de resultados acelerómetro MPU-6050 .....	72
Tabla 6. Resultados acelerómetro MPU-6050 .....	72
Tabla 7. Análisis de resultados acelerómetro MyRIO .....	73
Tabla 8. Resultados acelerómetro MyRIO.....	74
Tabla 9. Análisis de resultados acelerómetro sensor piezoeléctrico .....	75
Tabla 10. Resultados acelerómetro sensor piezoeléctrico .....	76
Tabla 11. Análisis de resultados acelerómetro Micrófono .....	77
Tabla 12. Resultados acelerómetro Micrófono .....	78

## Introducción

Generalmente en la industria nacional se maneja el funcionar hasta fallar e históricamente así ha sido, este método genera costos elevados en reparaciones adicionalmente los tiempos de productividad de una empresa se ven afectados por estas fallas.

Posterior a esto se diseñaron cronogramas de mantenimientos periódicos preventivos en donde de acuerdo al cronograma se programan paradas de funcionamiento en donde se realizan ajustes, reparaciones y reacondicionamientos a las maquinas involucradas en el proceso con el fin de evitar fallas y extender el tiempo de vida de las máquinas, aun así, el error humano está presente afecta este tipo de mantenimientos ya que, aunque se programan mantenimientos preventivos es casi que imposible verificar el estado y correcto funcionamiento de todos los componentes que hacen parte de una maquina rotativa adicionalmente las fallas se presentan de forma inesperada siendo afectada por diferentes tipos de factores externos los cuales no siempre se pueden prever haciéndose necesario un mantenimiento correctivo ocasionando pérdidas económicas a las empresas.

Últimamente se ha innovado en técnicas de mantenimiento, destacándose entre ellas el mantenimiento predictivo que básicamente es monitorear equipos con el fin de predecir fallas con el comportamiento anómalo de variables relacionadas con el equipo, dentro de estas variables y siendo una de las más importantes se encuentra la vibración la cual nos permite en máquinas rotativas como motores que generalmente están involucrados en procesos críticos de producción predecir estas fallas antes de que ocurran, mediante este proyecto implementaremos y desarrollaremos un sistema que me permita predecir fallas a través de las vibraciones generadas en máquinas rotativas, este desarrollo no solo permitirá predecir fallas si no que será

una plataforma que permita el aprendizaje de todas las temáticas relacionadas en este proceso desde la parte de programación, linealización de sensores sistemas de potencia, análisis de datos y tratamiento de señales entre otras.

## Objetivos

### Objetivo General

Implementar un sistema de adquisición de datos que permite predecir fallas mecánicas en los motores mediante el estudio de sus vibraciones.

### Objetivos Específicos

1. Implementar el hardware necesario para el sistema (Sensores, sistemas de adquisición de datos)
2. Diseñar el software que permita obtener la información necesaria para el estudio
3. Simular tres fallas comunes que generen vibraciones en máquinas rotativas con hélices
4. Desarrollar una interfaz que permita visualizar y analizar los datos obtenidos
5. Demostrar la ventaja de implementar sistemas de mantenimiento predictivo en la industria
6. Implementar y desarrollar una plataforma que permita el análisis de vibraciones a nivel académico.

## **Definición del problema**

Actualmente en la industria colombiana es muy importante realizar mantenimiento a maquinaria rotativa de la cual dependen procesos críticos en una planta de producción, actualmente los tipos de mantenimiento que se realizan son mantenimientos reactivos en los cuales solo se ejecutan correctivos cuando la maquinaria ya presenta una falla mayor que afecta económicamente a la industria tanto en el costo de reparación como en los gastos que implican detener un proceso del cual depende la producción.

Generalmente en la industria nacional se maneja el funcionar hasta fallar e históricamente así ha sido, este método genera costos elevados en reparaciones adicionalmente los tiempos de productividad de una empresa se ven afectados por estas fallas.

Posterior a esto se diseñaron cronogramas de mantenimientos periódicos preventivos en donde de acuerdo al cronograma se programan paradas de funcionamiento en donde se realizan ajustes, reparaciones y reacondicionamientos a las maquinas involucradas en el proceso con el fin de evitar fallas y extender el tiempo de vida de las máquinas.

Aun así, el error humano afecta este tipo de mantenimientos ya que, aunque se programan mantenimientos preventivos las fallas se presentan haciéndose necesario un mantenimiento correctivo ocasionando pérdidas económicas a las empresas.

Últimamente se ha innovado en técnicas de mantenimiento, destacándose entre ellas el mantenimiento predictivo que básicamente es monitorear equipos con el fin de predecir fallas con el comportamiento anómalo de variables relacionadas con el equipo.

Dentro de estas variables y siendo una de las más importantes se encuentra la vibración la cual nos permite en máquinas rotativas como motores que generalmente están involucrados en procesos críticos de producción predecir estas fallas antes de que ocurran.

Mediante este proyecto implementaremos y desarrollaremos un sistema que me permita predecir fallas a través de las vibraciones generadas en máquinas rotativas

## **Justificación**

La función principal de un mantenimiento es que una maquina opere sin fallas y principalmente las que son fundamentales en un proceso de producción, a nivel mundial se está innovando en lo que a mantenimientos se refiere, una de las principales tendencias que se está manejando es el mantenimiento predictivo, el cual consiste en diseñar técnicas que permitan detectar fallas y/o defectos de maquinaria en etapas iniciales con el fin de evitar que estas fallas sean mayores durante su funcionamiento, impidiendo que se ocasionen paros de emergencia no programados. La principal misión del mantenimiento predictivo es mantener en funcionamiento de la maquinaria y en caso de obtener señales o síntomas que indiquen una posible falla programar revisiones en momentos oportunos.

Algunas de las señales que se monitorean para detectar posibles fallas son temperatura, ruido, ultrasonido, vibraciones, amperaje entre otras, de allí como una técnica de predicción de fallas, se implementa el análisis de vibraciones el cual consiste en que mediante la implementación de sensores de vibración a una maquina rotativa y a través de un sistema de adquisición, tomar señales y detectar patrones que permitan identificar vibraciones anómalas a su funcionamiento normal logrando así detectar una falla antes de que esta se convierta en una mayor.

A nivel Colombia las industrias no utilizan el mantenimiento predictivo y se centran en un mantenimiento preventivo e inclusive en su mayoría correctivo, lo que ocasiona que a nivel económico afecte a la industria ya que requiere cambio o reparación de maquinaria de alto costo lo cual no solo incurre en el costo de reparación, sino que también los costos que implican el paro de un proceso por ejemplo en una planta de producción.

Es por esto que mediante este proyecto se busca diseñar e implementar un sistema que permita realizar análisis de vibraciones a máquinas rotativas demostrando los beneficios a nivel industrial que se tienen al implementar este tipo de soluciones.



## **Marco Referencial**

### **Mantenimiento Predictivo**

Dos aspectos principales logran el mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas sobre otros métodos generales de mantenimiento.

- La reducción de costos
- El aumento de la seguridad sobre el funcionamiento de los equipos.

Esto consiste en la configuración de una metodología que permita la vigilancia continua de las máquinas, especialmente aquellas que son las principales y las de importancia relativa en el proceso productivo de la empresa industrial.

Para que esta nueva metodología, basada en la vigilancia continua, sea eficaz frente a los conceptos tradicionales de mantenimiento, deberá abarcar los objetivos siguientes:

1. No impedir o limitar el funcionamiento de la máquina durante su ejecución.
2. Su costo de implantación debe ser menor que el ocasionado por otro tipo de mantenimiento.
3. Debe permitir la detección de la avería en fase incipiente antes de convertirse en catastrófica, así como la identificación o diagnóstico de la causa que la origina.

Se puede afirmar que el mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas, a través de la medición continua o periódica, el análisis y control de determinados parámetros y la opinión técnica de los operadores de experiencia conforman los indicadores del "estado de salud" o condición de la máquina que cumple con los objetivos anteriores.

Las máquinas ideales no vibran. Toda la energía que intercambia es empleada para efectuar el trabajo para el cual fue diseñada. En la práctica la vibración aparece producto de la transmisión normal de fuerzas cíclicas a través de los mecanismos. Los elementos de la máquina disipan una parte de la energía que se le entregó dando a la estructura una vibración característica.

Una buena concepción de fallas es el nivel de vibración. Son muchos los factores de operación, diseño y montaje que provocan el surgimiento de los diferentes niveles de vibración.

El hecho de que la condición de la máquina esté íntimamente ligada con las vibraciones que ella produce hace que la medición, el análisis de vibraciones, el análisis de señales y el análisis mecánico sean las herramientas básicas del mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas.

#### Aspectos Básicos de un Mantenimiento Predictivo

El método general de mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas tiene el objetivo final de asegurar el correcto funcionamiento de las máquinas a través de la vigilancia continua de los niveles de vibración en las mismas, siendo estos últimos, los indicadores de su condición; y se ejecuta sin necesidad de recurrir a desmontajes y revisiones periódicas. Este método considera de antemano que la empresa industrial opera con la suficiente disciplina tecnológica en su maquinaria, esto es: el usuario debe observar las normas de explotación del fabricante. De aquí se desprende la importancia de la conducta de buenas prácticas de operadores y demás personal técnico en la industria.

Esta metodología considera a cada máquina individualmente. Es reemplazada la revisión periódica del mantenimiento preventivo, por la medición regular con la cual se obtiene la

evolución total del funcionamiento. Las vibraciones mecánicas son un excelente indicador de estas condiciones, por esta razón el mantenimiento por condición se basa en este parámetro. El axioma del mantenimiento por condición consiste en que las revisiones son efectuadas justamente en el momento en que las mediciones indican que son necesarias. Esta precisamente es la confirmación de la intuición del personal de explotación experimentado, que como resultado de su experiencia piensan, que las máquinas no deben ser tocadas si funcionan bien. Sin embargo, a estos técnicos calificados les era imposible justificar el momento de rotura de la máquina. Las mediciones regulares permiten determinar los niveles inaceptables y definir la correspondiente parada de la máquina.

Como ya se conoce, las vibraciones son normalmente el producto de la transmisión de fuerzas lo que provoca el desgaste y/o deterioro de las máquinas. A través de determinados elementos de las mismas, una fracción de estas fuerzas es disipada hacia el exterior, por ejemplo, mediante los apoyos, uniones, etc. Lo que permite medir la vibración debida a las fuerzas excitadoras. Así, si las fuerzas de excitación se mantienen constantes dentro de ciertos límites, el nivel de vibración medido se mantiene dentro de los mismos límites proporcionalmente. Cuando los defectos comienzan a aparecer, los procesos dinámicos de la máquina son alterados, alterándose las fuerzas que, como resultado, darán una modificación al espectro de vibración. Si se es capaz de transformar el movimiento mecánico, proporcional a las fuerzas actuantes, en señal eléctrica, entonces, la señal de vibración contendrá la información relativa a las condiciones de funcionamiento de la máquina, que de por sí caracteriza el estado técnico de sus partes y componentes, pues cada una tiene la particularidad de vibrar a una frecuencia característica.

La teoría mecánica arriba expuesta conduce a definir que la herramienta básica del presente mantenimiento es, por tanto, el análisis de vibraciones y, los principios en que se basa son los siguientes:

1. Toda máquina en correcto estado de operación tiene un cierto nivel de vibraciones y ruidos, debido a los pequeños defectos de fabricación. Esto puede considerarse como el patrón de referencia, nivel base característico o estado básico de esa máquina en su funcionamiento satisfactorio.
2. Cualquier defecto en una máquina, incluso en fase incipiente, lleva asociado un incremento en el nivel de vibración perfectamente detectable mediante la medición.
3. Cada defecto, aún en fase incipiente, lleva asociado cambios específicos en las vibraciones que produce (espectros), lo cual permite su identificación. La importancia del método de Análisis por Vibraciones Mecánicas, sustentado en los avances de la moderna tecnología de medición y en el análisis dinámico temporal y frecuencial de señales, y utilizado como herramienta del mantenimiento predictivo, permite hoy en día, detectar con gran precisión desde desgastes de cojinetes antifricción, hasta qué diente de un reductor de engranajes está dañado. El alcance atribuido al mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas está supeditado a la mayor rentabilidad, seguridad y precisión en el diagnóstico.

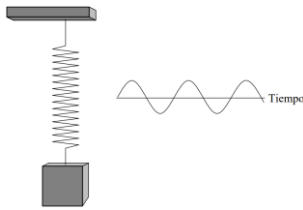
## Vibraciones

En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es la a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento.

### Movimiento Armónico Simple

El movimiento más sencillo que pueda existir es el movimiento en una dirección, de una masa controlada por un resorte único. Este sistema mecánico se llama sistema resorte-masa, con un grado único de libertad. Si se desplaza la masa, hasta una cierta distancia del punto de equilibrio, y después se suelta, el resorte la regresará al

equilibrio. Para entonces, la masa tendrá algo de energía cinética y rebasará la posición de descanso y desviará el resorte en la dirección opuesta. Perderá velocidad hasta pararse en el otro extremo de su desplazamiento donde el resorte volverá a empezar el regreso hacia su punto de equilibrio. El mismo proceso se volverá a repetir con la energía transfiriéndose entre la masa y el resorte, desde energía cinética en la masa hasta energía potencial en el resorte, y regresando. La ilustración siguiente enseña una gráfica de la masa contra el tiempo:



*Ilustración 1 Oscilación de un resorte*

Si no hubiera fricción en el sistema, la oscilación continuaría en la misma proporción y en la misma amplitud para siempre. Este movimiento armónico sencillo idealizado, casi nunca se encuentra en sistemas mecánicos reales. Cualquier sistema real tiene fricción y eso hace que la amplitud de la vibración disminuya gradualmente ya que la energía se convierte en calor.

Las definiciones siguientes son aplicables al movimiento armónico sencillo:  $T$ =el periodo de la onda El periodo es el tiempo necesario para un ciclo, o para un viaje ida y vuelta, o de un cruce del nivel cero hasta el siguiente cruce del nivel cero en la misma dirección. El periodo se mide en segundos o milisegundos dependiendo de qué tan rápido se cambie la onda.

$F$ =la frecuencia de la onda =  $1/T$

### Análisis de Frecuencia

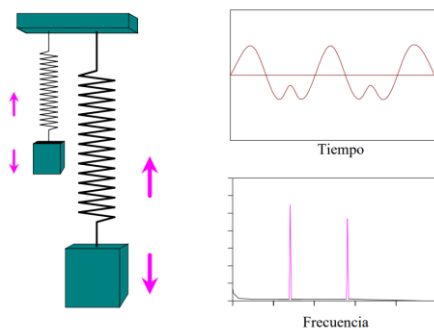
Para circunvalar las limitaciones del análisis de la forma de onda, la practica más común es de llevar a cabo un análisis de frecuencias, también llamado análisis de espectro de la señal de vibración. La gráfica en el dominio del tiempo se llama la forma de onda, y la gráfica en el dominio de la frecuencia se llama el espectro. El análisis del espectro es equivalente al transformar la información de la señal del dominio de tiempo en el dominio de la frecuencia.

Las relaciones siguientes son válidas entre tiempo y frecuencia:

$$Tiempo = \frac{1}{Frecuencia}$$

$$Frecuencia = \frac{1}{Tiempo}$$

En el dibujo de abajo observen que los diferentes componentes son separados y distintos en el espectro y que sus niveles pueden ser fácilmente identificados. Sería difícil de extraer esta información de la forma de onda en el dominio de tiempo.

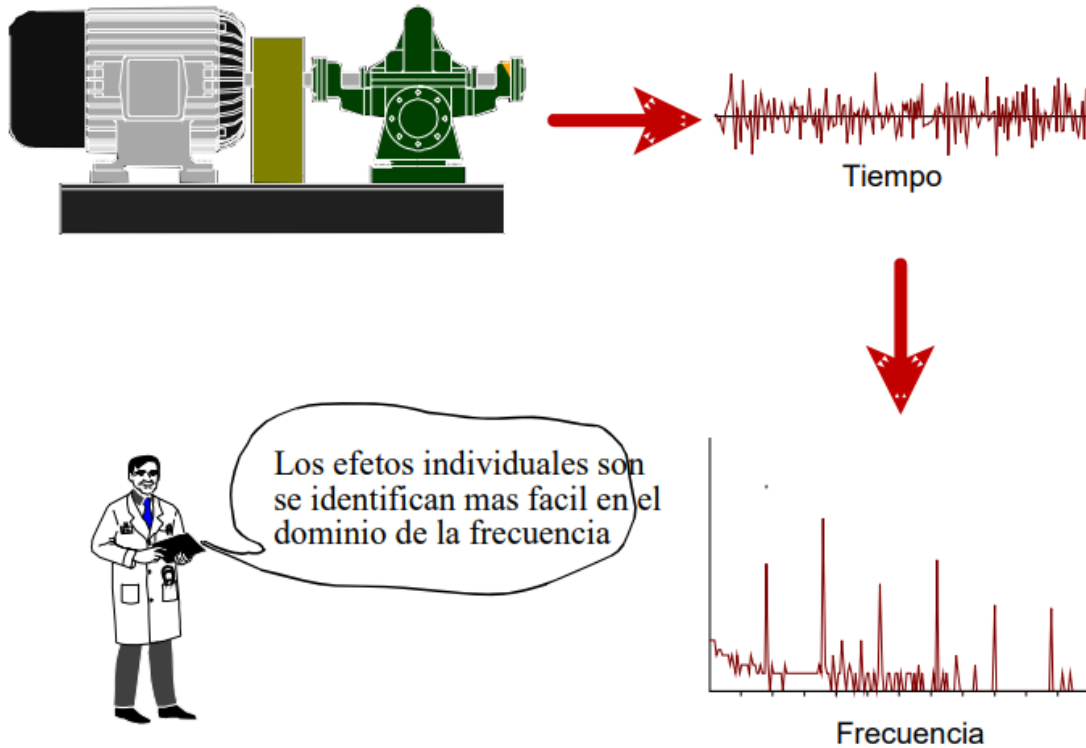


*Ilustración 2. Frecuencia vs tiempo*

En el dibujo siguiente, vemos que algunos eventos que se traslapan y que son confusos en el dominio de tiempo están separados en sus componentes individuales en el dominio de la frecuencia. La forma de la onda de vibración contiene una gran cantidad de información que no es aparente. Parte de la información está en las componentes de nivel muy bajo, la magnitud de los que puede ser menos ancho que la línea de la gráfica, de la forma de onda.

Pero estos componentes de bajo nivel pueden ser importantes, si son una indicación de un problema que está creciendo, como una falta en un rodamiento. La esencia del mantenimiento

predictivo es la detección temprana de faltas incipientes. Por eso hay que ser sensible a valores muy pequeños de señales de vibración.



*Ilustración 3. Frecuencia vs tiempo en motores*



## Diseño

### Descripción de los Componentes

Para el diseño e implementación del prototipo se tuvieron en cuenta actuadores, sensores, circuitos de acondicionamiento y controladores que permiten la adquisición y acondicionamiento de señal adecuado para nuestro analizador de vibraciones, los elementos mencionados anteriormente se presentan a continuación:

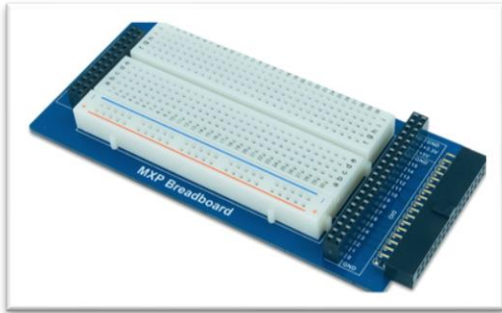
#### NI myRIO – 1900



*Ilustración 4. MyRIO*

El myRIO es un Dispositivos Embebido para Estudiantes que cuenta con E/S en ambos lados del dispositivo en forma de conectores MXP y SMP. Incluye entradas analógicas, salidas analógicas, líneas de E/S digitales, LEDs, un push-button, un acelerómetro interno, un FPGA Xilinx, un procesador dual-core ARM Cortex-A9 y también incluyen soporte para Wi-Fi. Usted puede programar el myRIO con LabVIEW o C.

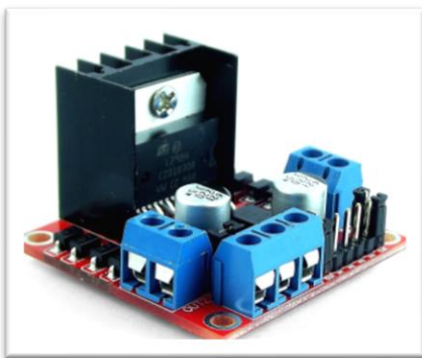
### Breadboard Adapter for NI MyRIO



*Ilustración 5. Breadboard adapter for NI MyRIO*

La placa de pruebas MXP proporciona una placa de pruebas de 300 conexiones y una barra de bus de 50 conexiones en una tarjeta de expansión compatible con el puerto de expansión myRIO (MXP). La placa de pruebas MXP funciona como una salida de E / S, con señales digitales y analógicas asignadas a dos encabezados a cada lado de la placa de pruebas. El conector de la placa de pruebas MXP también está codificado para garantizar una conexión correcta con su NI myRIO.

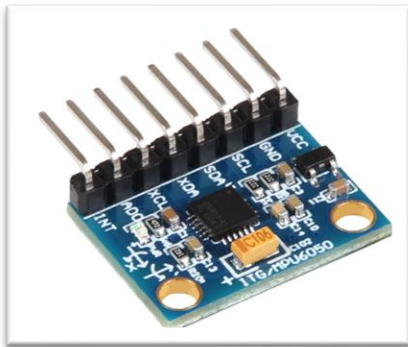
### Puente H L298N



*Ilustración 6. Puente H L298N*

Módulo puente H L298N es una tarjeta para el control de motores de corriente directa, motores a pasos, solenoides y en general cualquier otra carga inductiva. Puede manejar 2 amperes constantes.

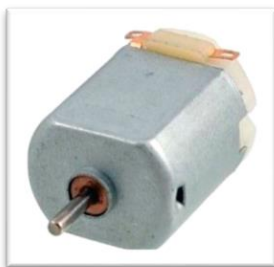
#### Acelerómetro y Giroscopio MPU-6050



*Ilustración 7. Acelerómetro y giroscopio MPU-6050*

Los dispositivos MPU-6050 combinan un giroscopio de 3 ejes y un acelerómetro de 3 ejes en el mismo molde de silicio, junto con un Digital Motion Processor <sup>TM</sup> (DMP <sup>TM</sup>) integrado, que procesa complejos algoritmos MotionFusion de 6 ejes. El dispositivo puede acceder a magnetómetros externos u otros sensores a través de un bus I<sup>2</sup>C maestro auxiliar, lo que permite que los dispositivos recopilen un conjunto completo de datos de sensores sin la intervención del procesador del sistema

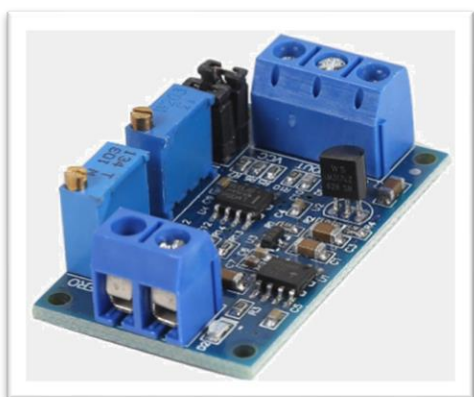
#### Motor DC



*Ilustración 8. Motor DC*

Motor DC pequeño de imán permanente y escobillas, 5 V, 11600 rpm, diámetro 1.56 cm

**Módulo Convertidor de Señal Transmisor de Voltaje HW-685**



*Ilustración 9. Módulo convertidor de señal transmisor de voltaje HW-685*

HW-685 Corriente al módulo de voltaje 0/4-20mA a 0-3. Convertidor de señal del transmisor de voltaje 3V/5V/10V Instrucciones de uso: 1. El módulo está cableado de acuerdo con la definición, la tensión de alimentación es de 7-36V (Si la salida es de 10V, la tensión de alimentación debe ser mayor que 12V) 2. Después de la alimentación, el D2 debería ser luz, de lo contrario Verifique la conexión de línea. La Junta reverso está protegida y no se queme la conexión inversa. 3. Cuando la corriente de entrada es el valor mínimo (0mA o 4mA), ajustar el potenciómetro de cero para hacer la VOUT el valor mínimo de salida (0.0V u otro voltaje). 4. Cuando la corriente de entrada es el valor máximo (20mA), Ajuste el potenciómetro del SPAN para hacer la VOUT el máximo valor de salida (3.3V o 5V o 10V. Cuando la entrada es 4-20ma, la salida puede ser tan pequeña como 2.5V)

### Modulo Elevador DC – DC XL6009E1



*Ilustración 10. Modulo Elevador DC – DC XL6009E1*

El XL6009 es un módulo elevador de alto rendimiento (BOOST) con corriente de conmutación de 4A. El módulo utiliza la segunda generación de tecnología de conmutación de alta frecuencia XL6009E1 como chip central, rendimiento mucho mayor que la primera generación de tecnología LM2577.

### Transmisor de Temperatura RTD – PT100



*Ilustración 11. Transmisor de temperatura RTD – PT100*

Es un transmisor pt100 de 4-20 mA montado en el cabezal de bajo costo que acepta sensores de temperatura RTD y convierte la salida del sensor en un rango seleccionado en una señal de transmisión de 4 a 20 mA. El transmisor es un dispositivo de dos cables, alimentado por bucle, y el usuario puede configurarlo completamente en un amplio rango de temperatura con la ayuda de un simple botón

### PT100 – WZP



*Ilustración 12. PT100 – WZP*

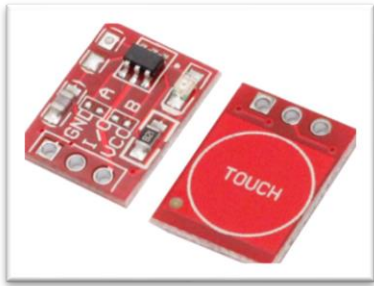
Esta sonda resistiva de temperatura de platino es un sensor de temperatura preciso, sensible y estable con una amplia gama de temperaturas de funcionamiento.

El sensor tiene un cuerpo cerámico protegido por un tubo de acero inoxidable que contiene un pequeño alambre de resistencia de platino sensible a la temperatura permitiendo temperaturas a medir entre -200 y 420°C.

La serie WZP tiene una estructura pequeña, amplio rango, una buena fiabilidad y corto tiempo de respuesta térmica.

Operan variando su resistencia como una función de la temperatura con una relación casi lineal y una desviación mínima. Con bajo auto calentamiento la sonda permite un máximo de corriente de 5 mA que resulta en un aumento de no más de 0.3°C.

#### Modulo Pulsador Táctil TTP223



*Ilustración 13. Modulo pulsador táctil TTP223*

Módulo pulsador táctil basado en el sensor capacitivo TTP223.

#### Sensor de Vibración Piezoeléctrico

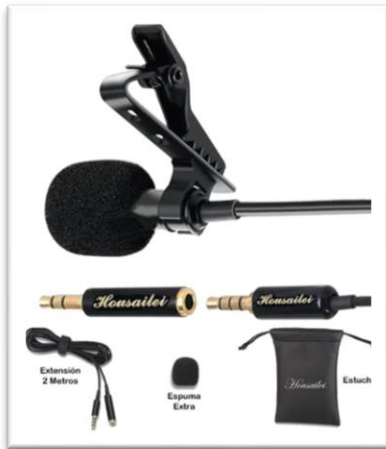


*Ilustración 14. Sensor de vibración piezoeléctrico*

El MINISENSE 100 es un sensor de vibración de bajo costo, de diseño en voladizo, el cual está construido con una masa en su extremo para ofrecer una alta sensibilidad a bajas

frecuencias. Los pines están diseñados para una fácil instalación y son soldables. Se ofrecen asimismo opciones de montaje horizontal y vertical. El área activa del sensor está protegida para un mejor rechazo de RFI y EMI (interferencia electromagnética o de radiofrecuencia).

### Micrófono



#### Características:

condensador omnidireccional

conector Jack 3.5 mm

para escuchar tus gradaciones debes desconectar el micrófono

Sensibilidad:  $-46 \pm 2$  dB.

Directividad: omnidireccional.

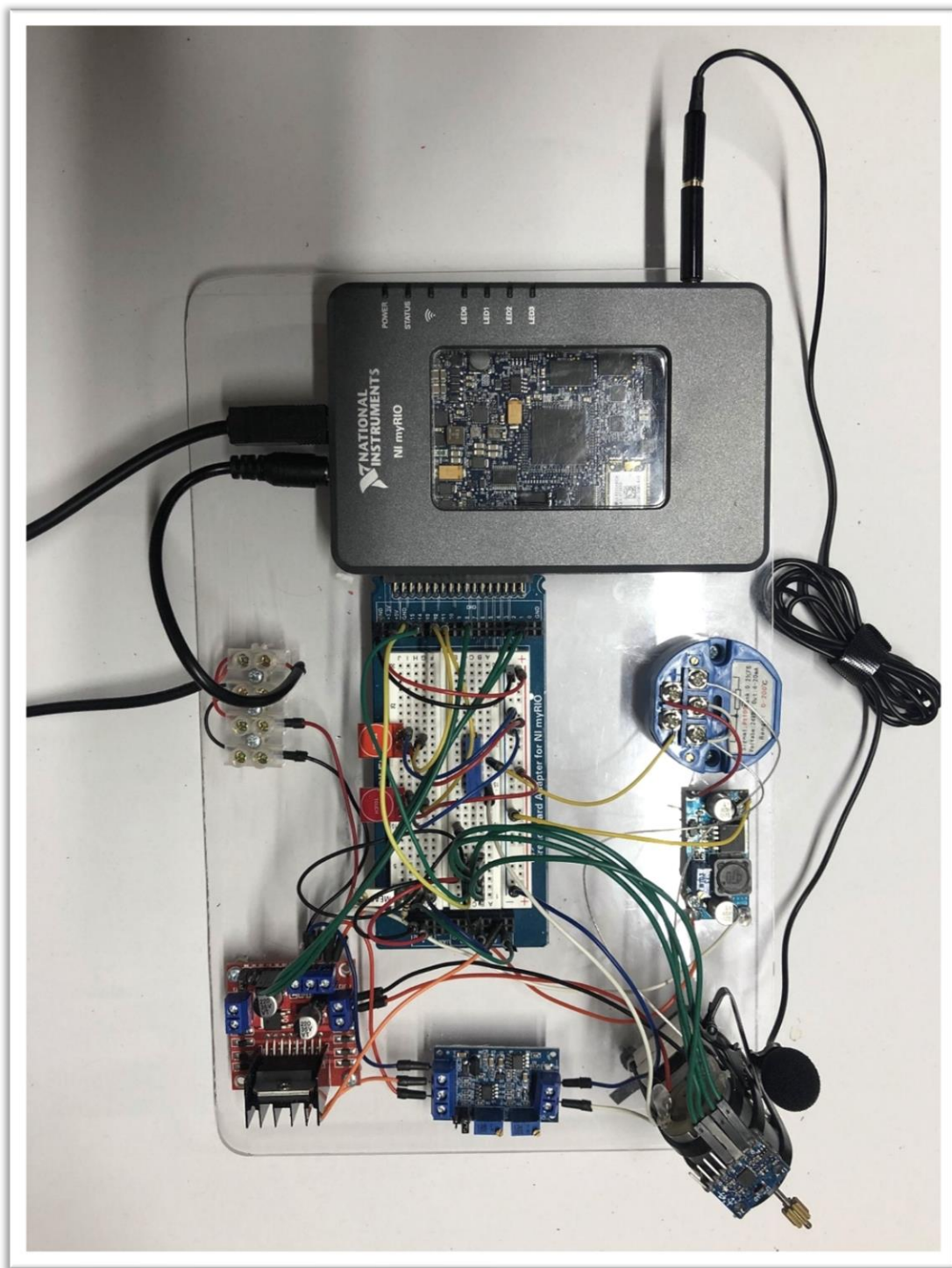
Relación señal/ruido: = 56 dB.

Rango de frecuencia: 50-16.000 Hz.



## Diseño del Circuito

El circuito fue montado sobre una placa acrílica transparente



*Ilustración 15. Circuito analizador de vibraciones*

## Control de Motor

Para el control del motor se incorporaron los siguientes componentes:

- (1) Puente H L298N
- (1) Motor DC
- (2) Modulo pulsador táctil TTP223
- (1) Fuente 12vDC

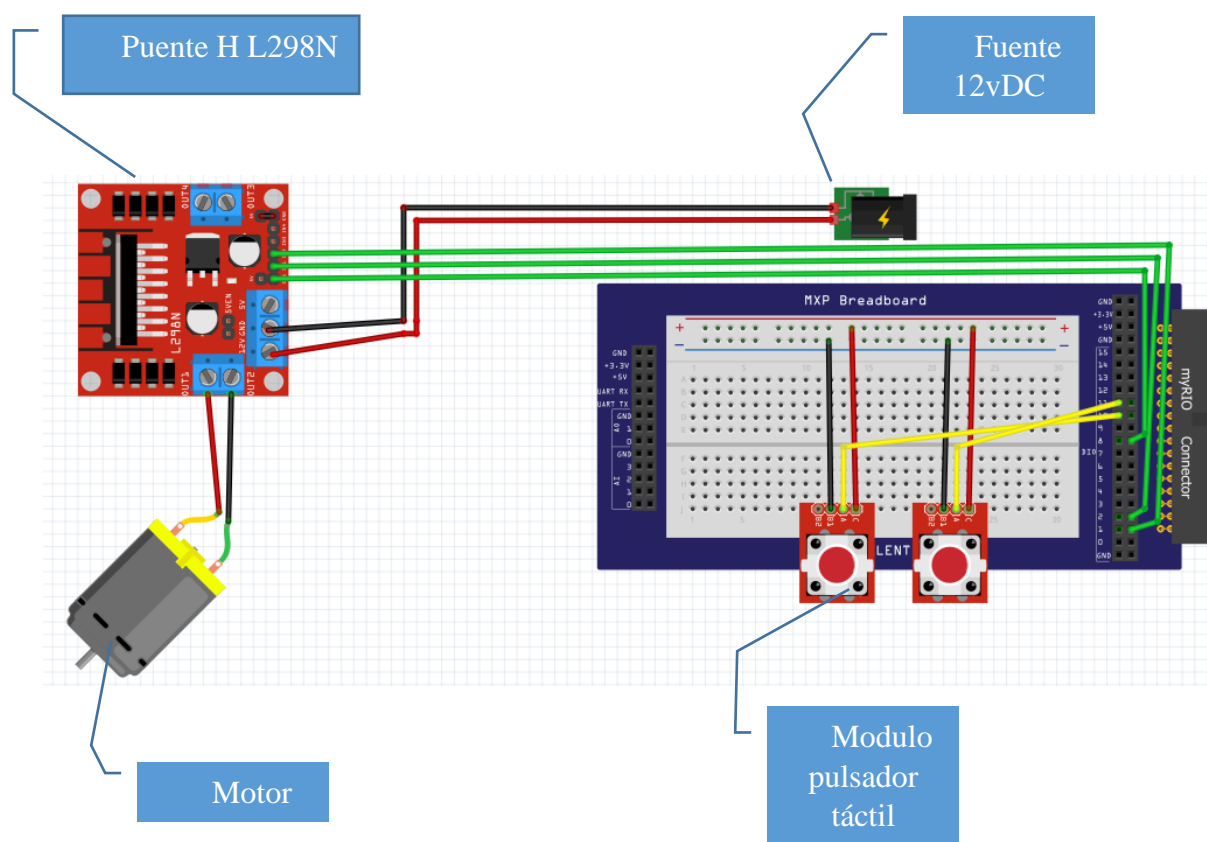


Ilustración 16. Esquemático circuito sistema de potencia

## Sensórica

Para la sensórica se incorporaron los siguientes componentes:

- (1) Acelerómetro y giroscopio MPU-6050
- (1) PT100 – WZP
- (1) Módulo convertidor de señal transmisor de voltaje HW-685
- (1) Modulo Elevador DC – DC X16009E1
- (1) Transmisor de temperatura RTD – PT100
- (1) Módulo convertidor de señal transmisor de voltaje HW-685
- (1) Micrófono
- (1) Sensor de vibración piezoeléctrico

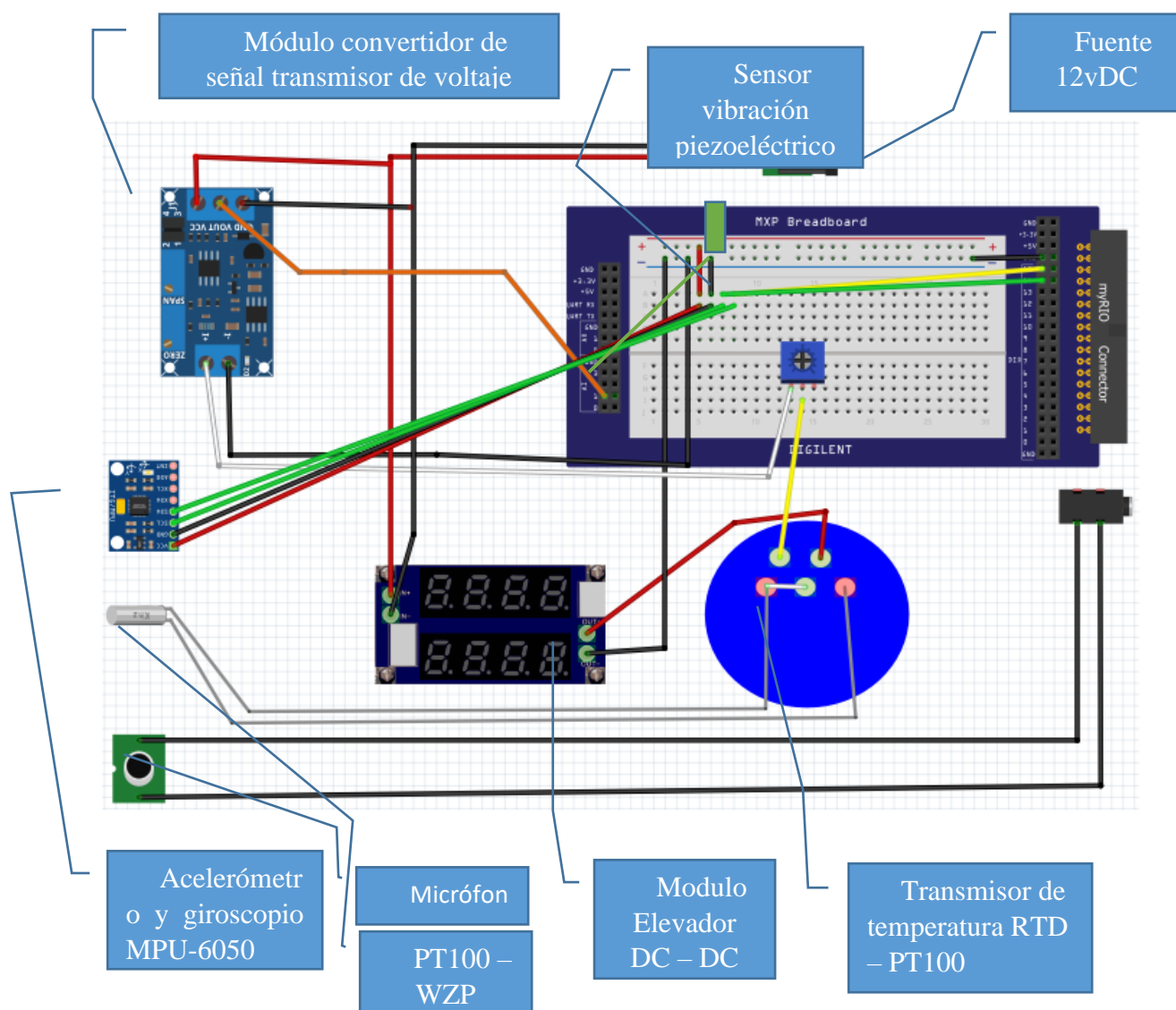


Ilustración 17. Esquemático circuitos sensores e instrumentación

## Hélices de Prueba

Para realizar las pruebas del circuito de tomaron 3 posibles escenarios:



*Ilustración 18. Hélices de prueba*

- Hélice en correcto estado



*Ilustración 19. Hélice en correcto estado*

- Hélice fisurada en una de sus aspas



*Ilustración 20. Hélice fisurada en una de sus aspas*

- Hélice sin un aspa



*Ilustración 21. Hélice sin un aspa*

## Diseño del software

Para el diseño del software se utilizó LabVIEW

Panel frontal:

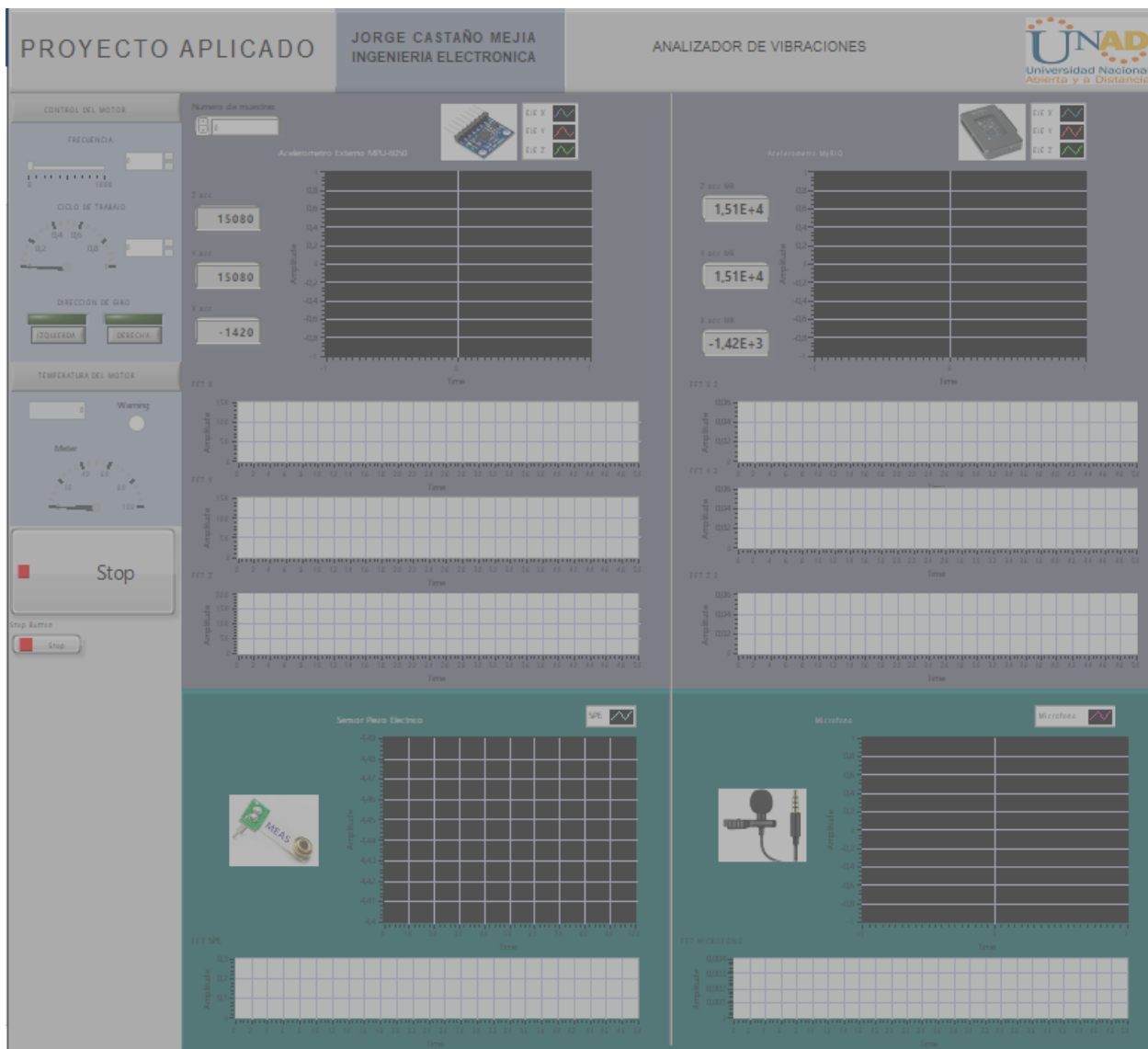


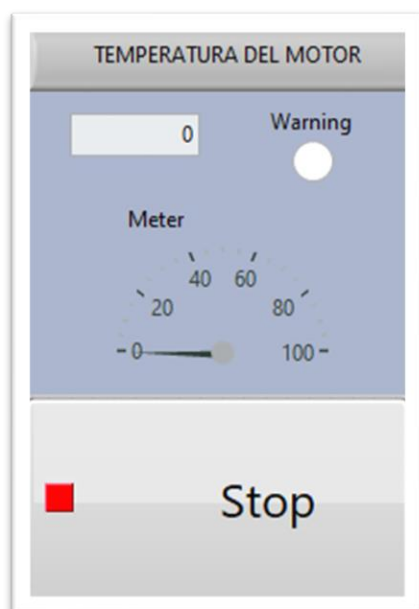
Ilustración 22. Panel frontal del programa

### Control del Motor:



*Ilustración 23. Control del motor en panel frontal*

### Indicador de Temperatura y STOP



*Ilustración 24. Indicador de temperatura en panel frontal*

## Bloque Acelerómetro Externo MPU-6050

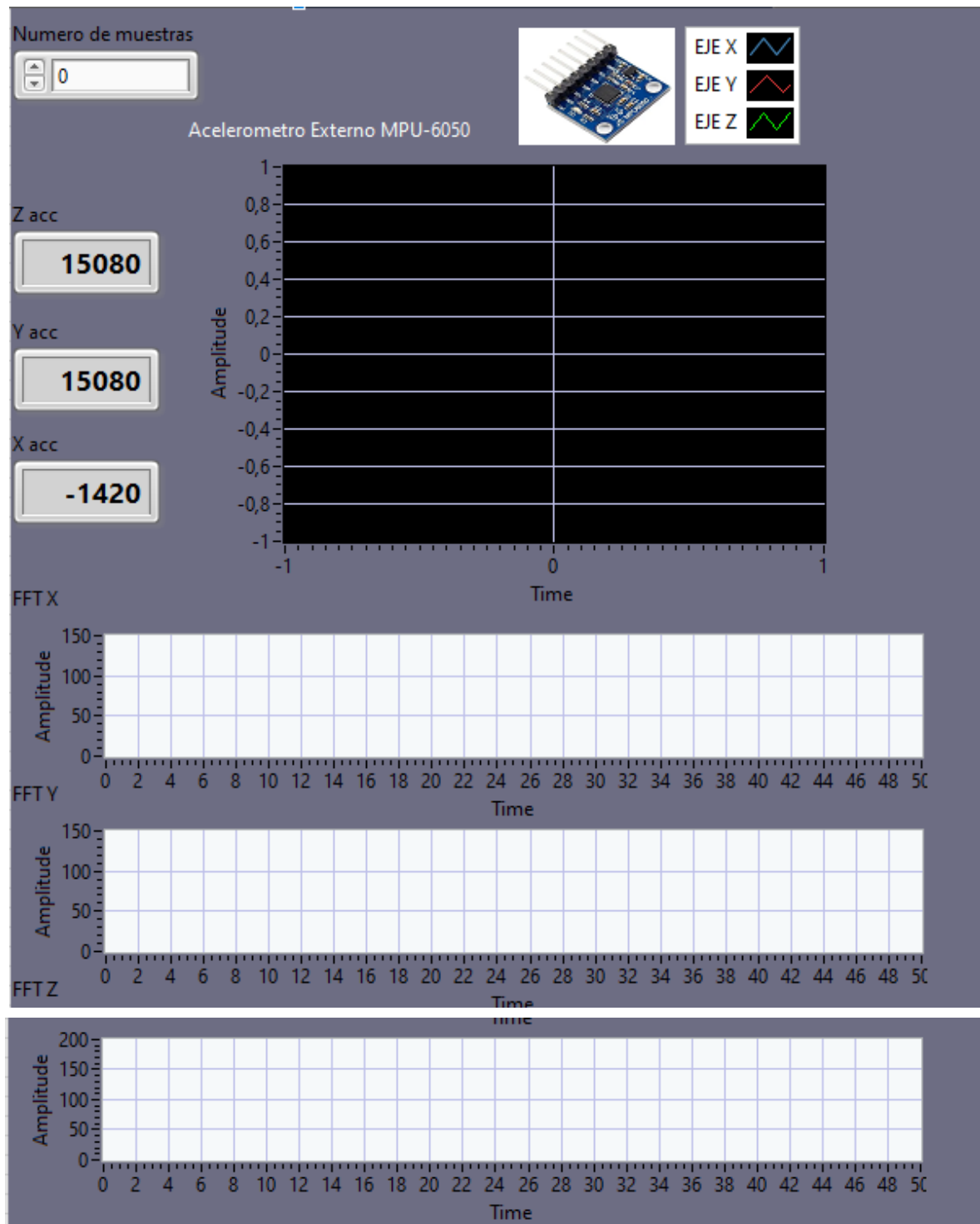
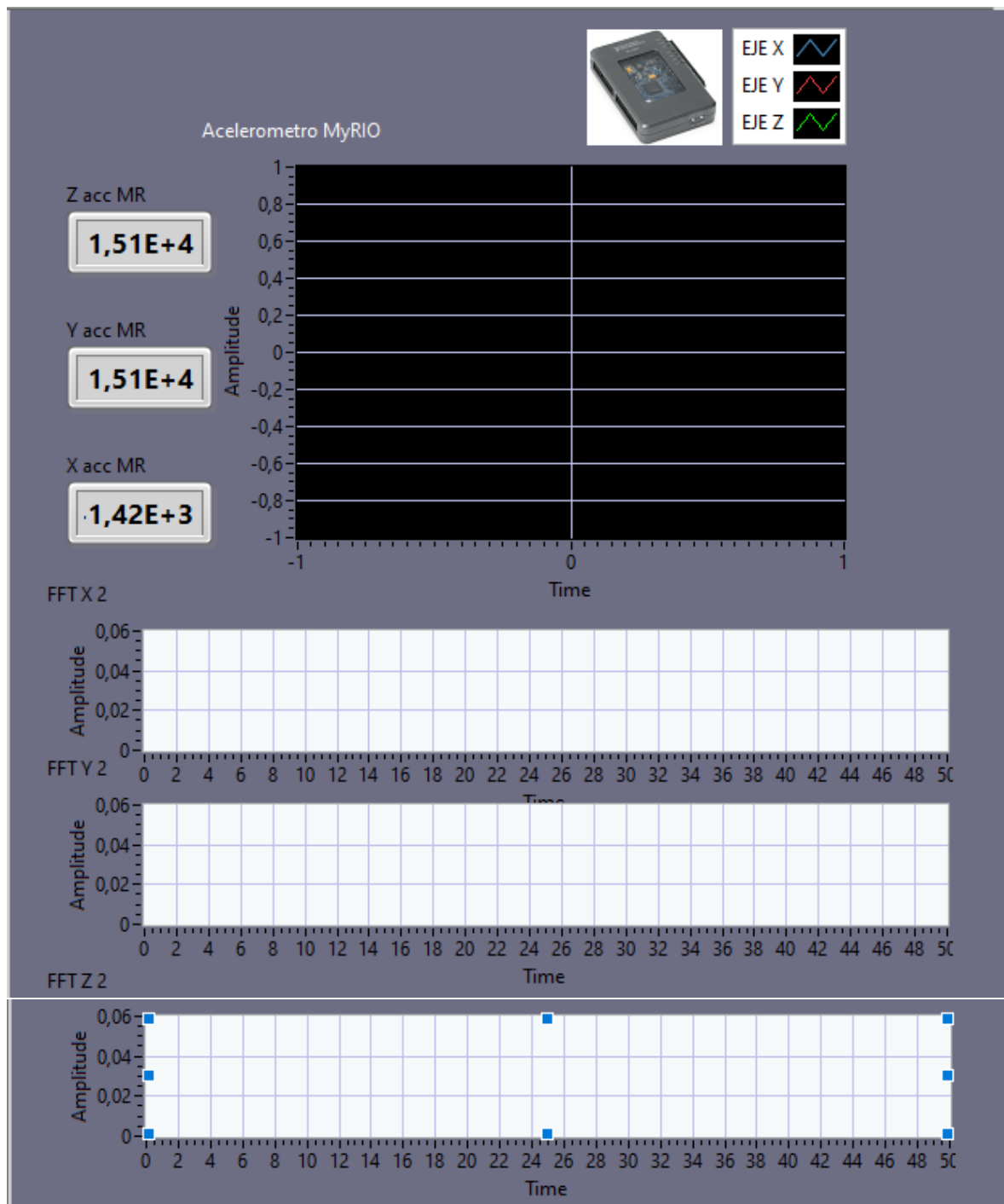


Ilustración 25. Bloque Acelerómetro Externo MPU-6050 en panel frontal

## Bloque Acelerómetro MyRIO

*Ilustración 26. Bloque Acelerómetro MyRIO en panel frontal*



## Bloque Sensor Piezoeléctrico

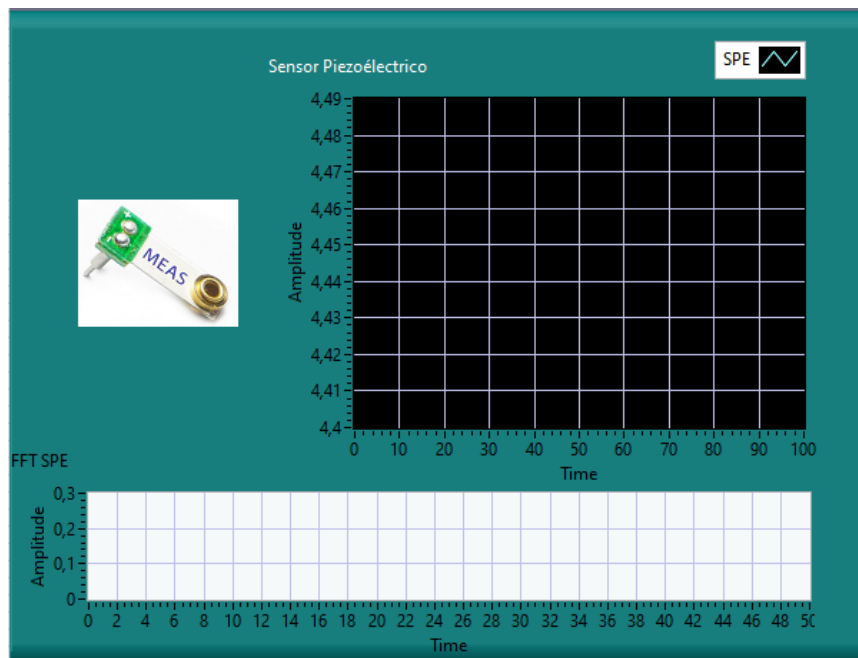


Ilustración 27. Bloque Sensor Piezoeléctrico en panel frontal

## Bloque Micrófono

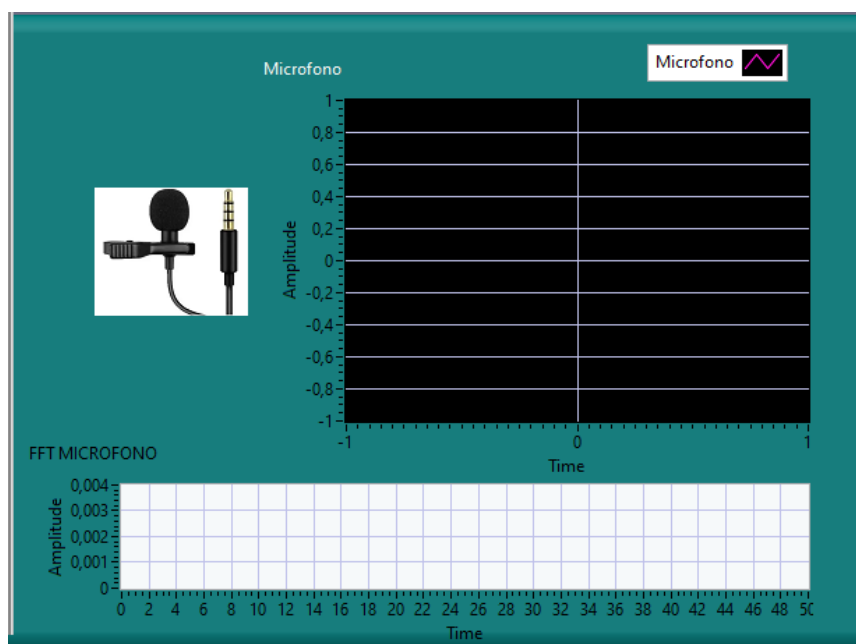


Ilustración 28. Bloque Micrófono en panel frontal

Diagrama de Bloques:

### Programación Principal (Main VI)

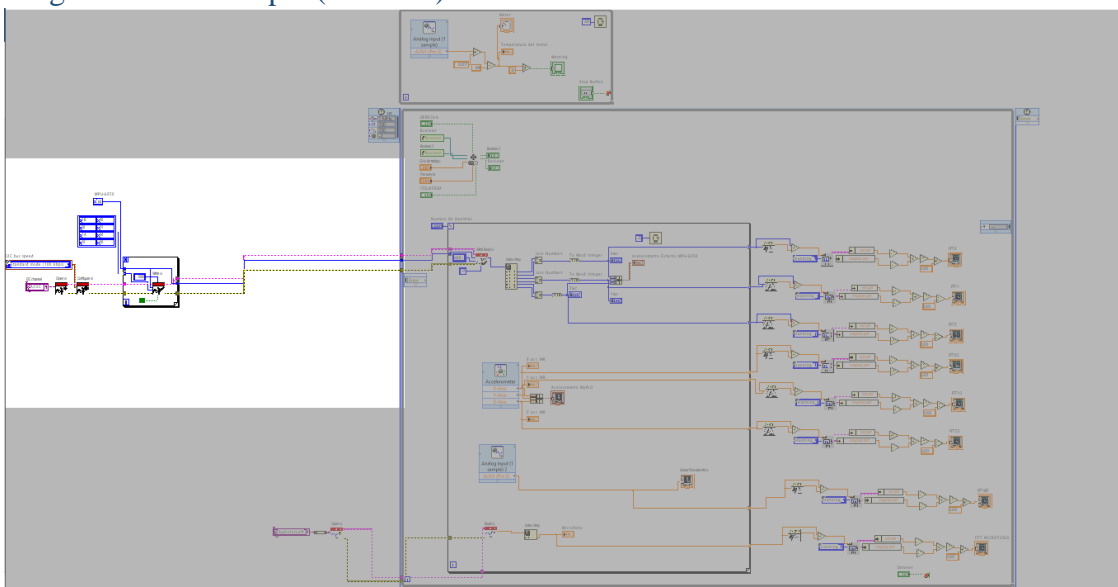


Ilustración 29. Programación principal (Main VI) en Diagrama de bloques

### Bloques de Programación secundarios (Sub VI)

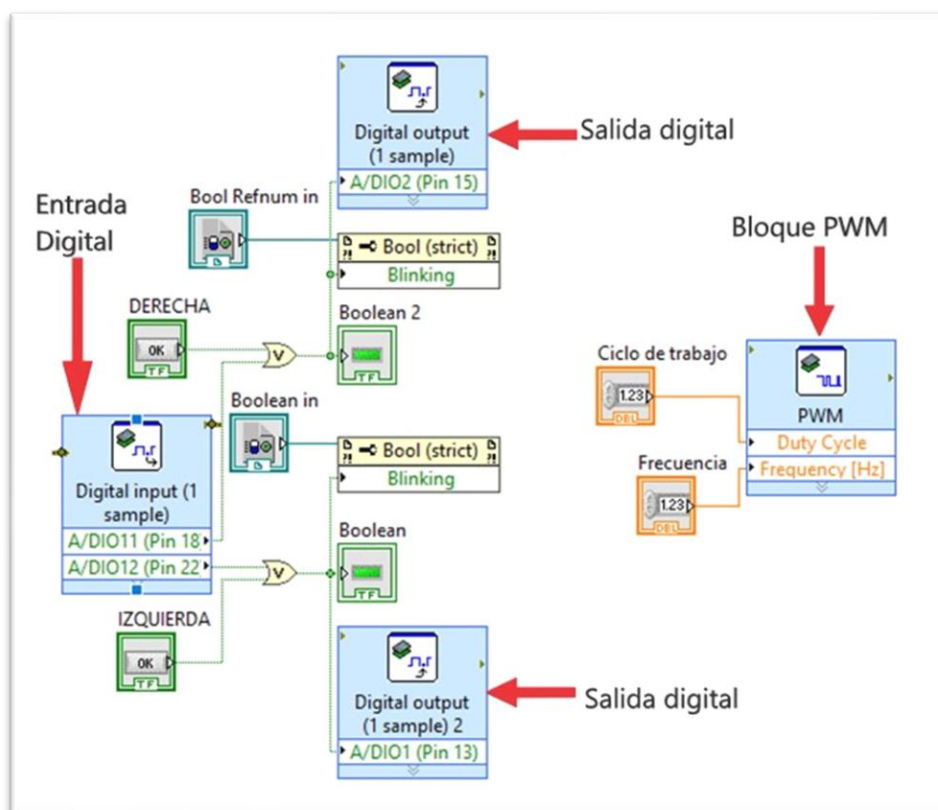


Ilustración 30. Control de motor diagrama de bloques (SubVI)

### Control de Temperatura:

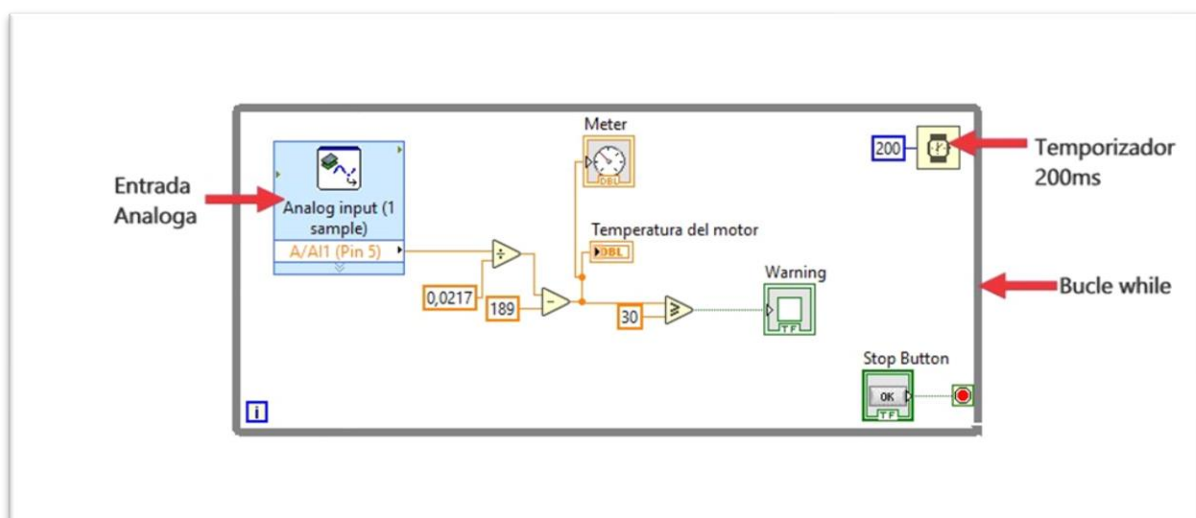


Ilustración 31. Control de temperatura diagrama de bloques

### Control del Motor:

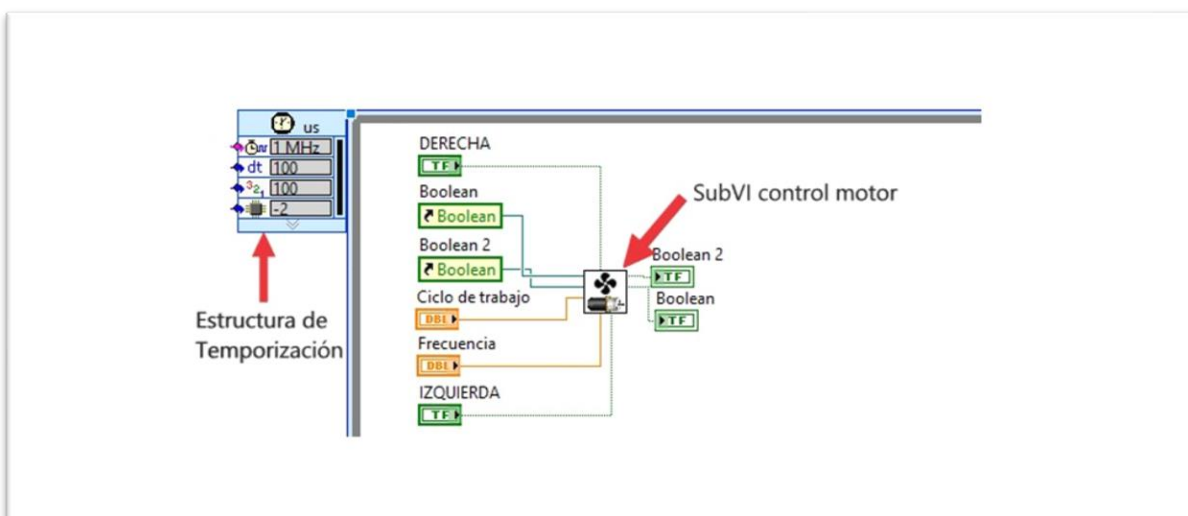


Ilustración 32. SubVI Control de motor

## Acelerómetro MyRIO

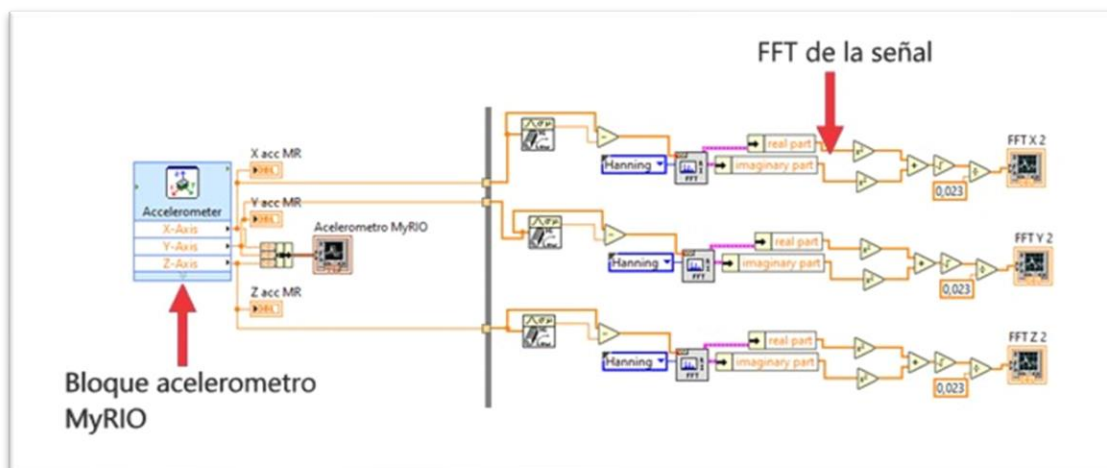


Ilustración 33. Adquisición de datos acelerómetro MyRIO diagrama de bloques

## Sensor de Vibración Piezoeléctrico:

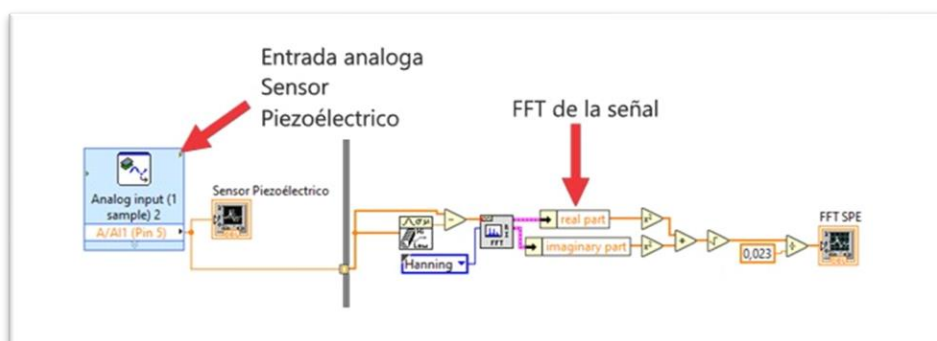


Ilustración 34. Adquisición de datos sensor piezoeléctrico

## Micrófono

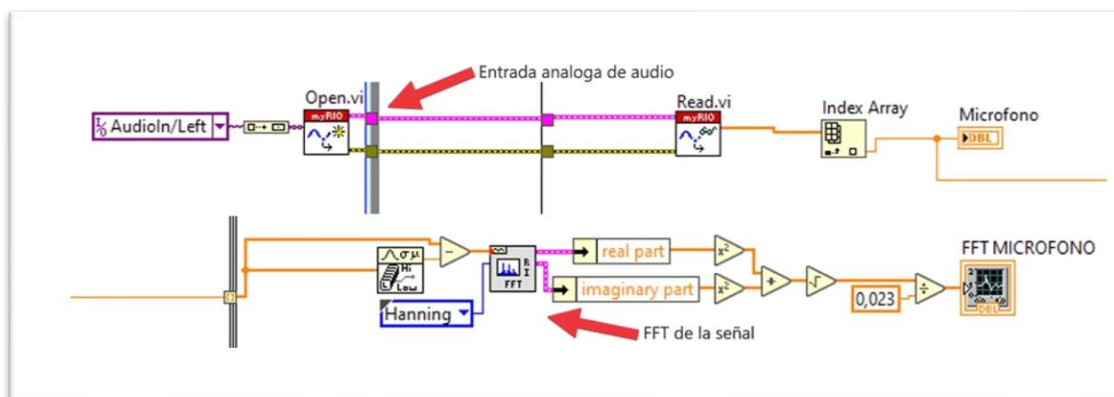


Ilustración 35. Adquisición de datos micrófono diagrama de bloques

## Acelerómetro Externo MPU-6050

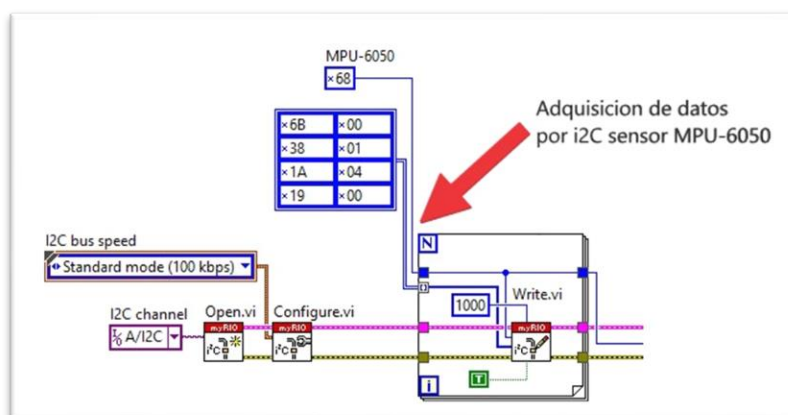


Ilustración 36. Adquisición de datos por i2C sensor MPU-6050 diagrama de bloques

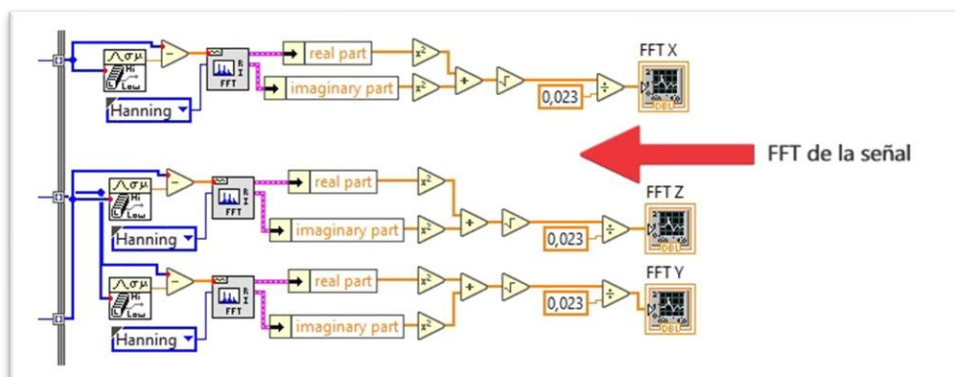


Ilustración 37. FFT MPU-6050

## Pruebas del Sistema

Para realizar estas pruebas se tomaron 100 muestras por segundo y se ajustaron los siguientes parámetros del motor:



*Ilustración 38. Configuraciones variables del motor*

**Frecuencia:** 100

**Ciclo de Trabajo:** 0,2

**Dirección de Giro:** Izquierda

Vibraciones sin Hélices, solo motor

### Acelerómetro Externo MPU-6050

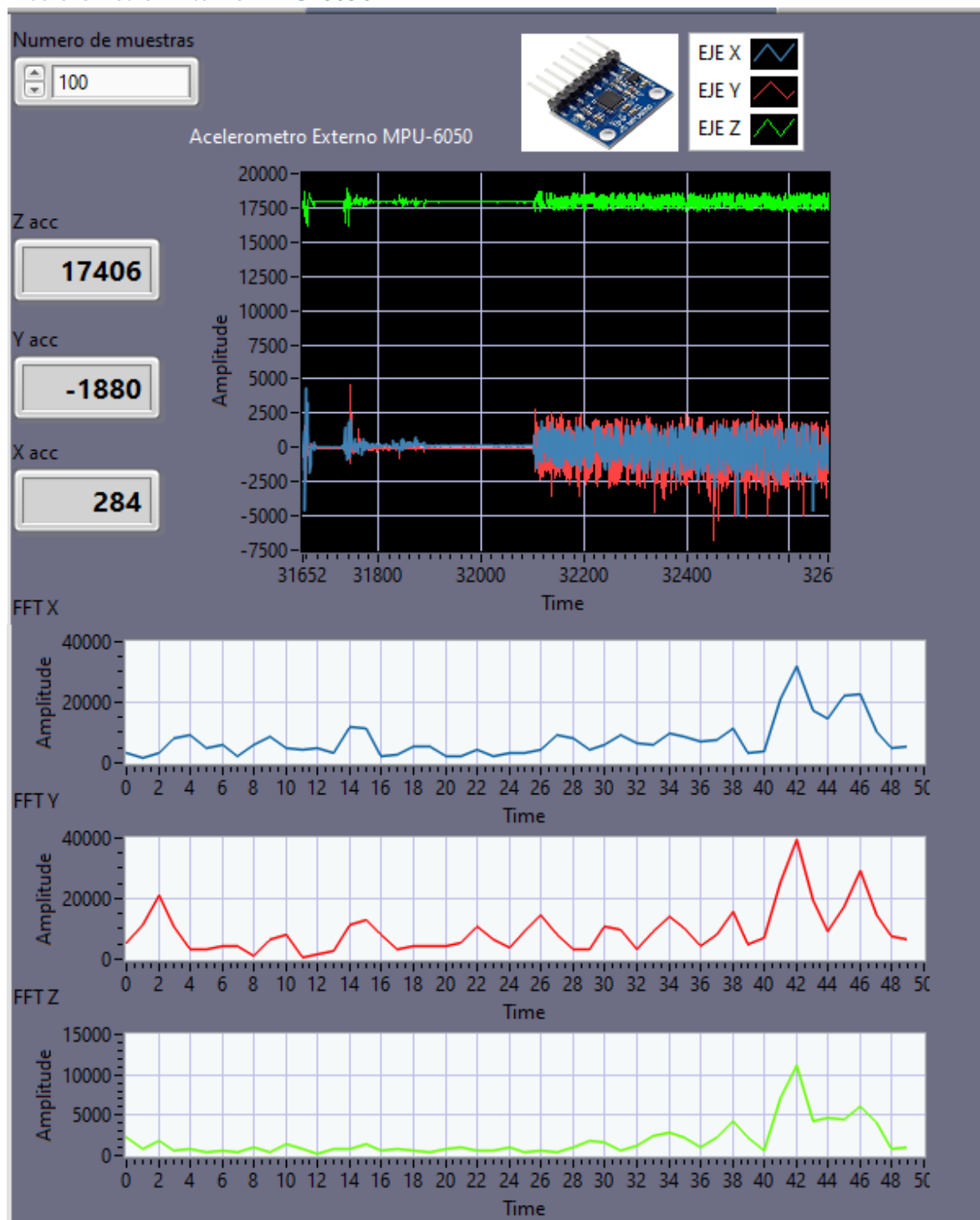


Ilustración 39. Vibraciones sin Hélices, solo motor (acelerómetro MPU-6050)

## Acelerómetro MyRIO

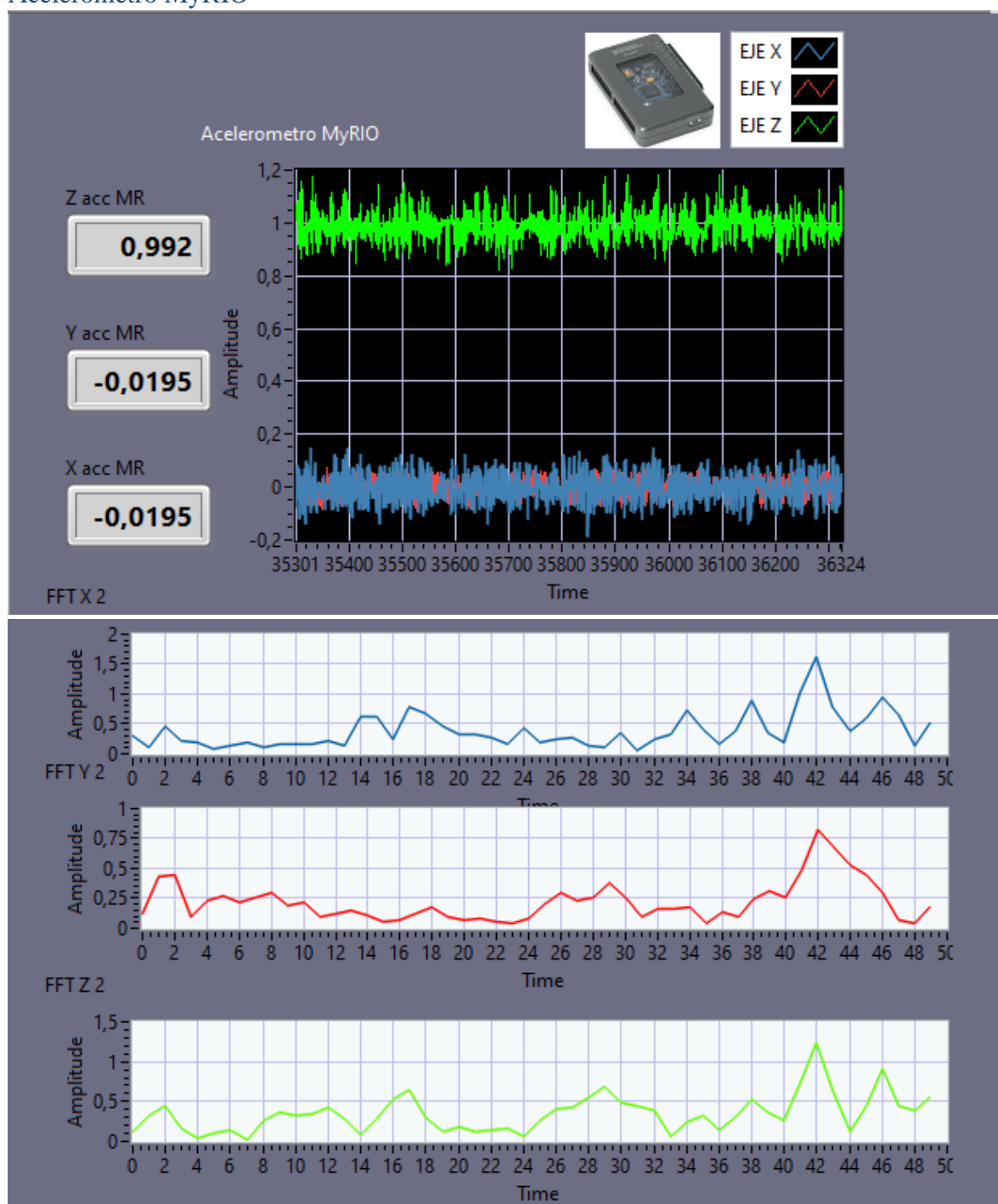


Ilustración 40. Vibraciones sin Hélices, solo motor (acelerómetro MyRIO)



## Sensor de Vibración Piezoeléctrico

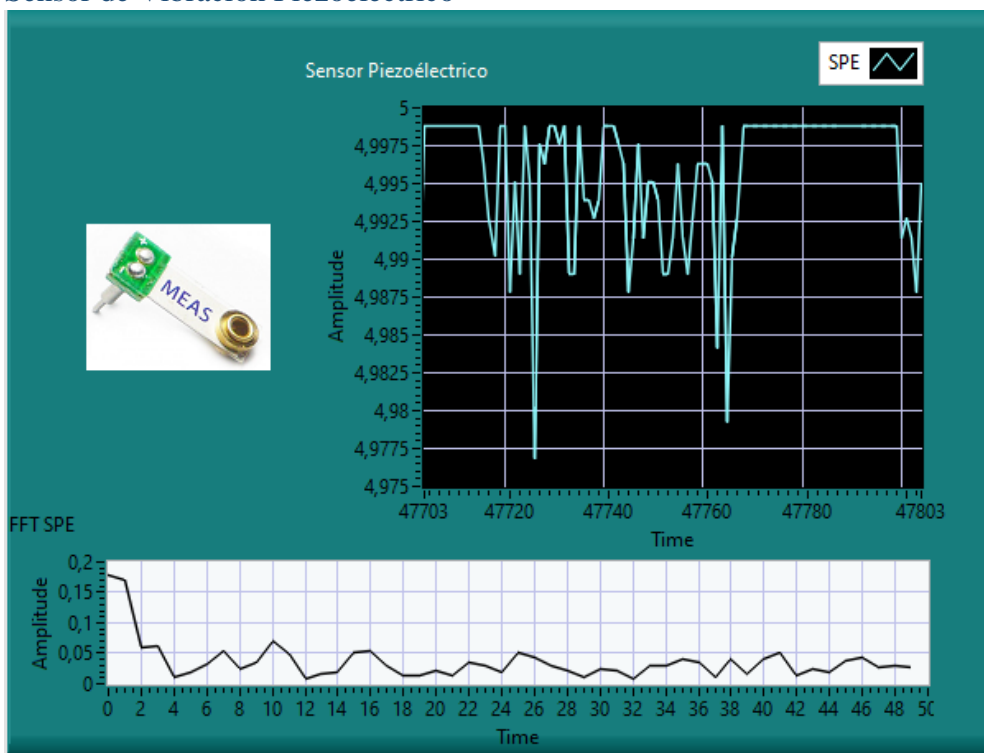


Ilustración 41. Vibraciones sin Hélices, solo motor (acelerómetro piezoeléctrico)

## Micrófono

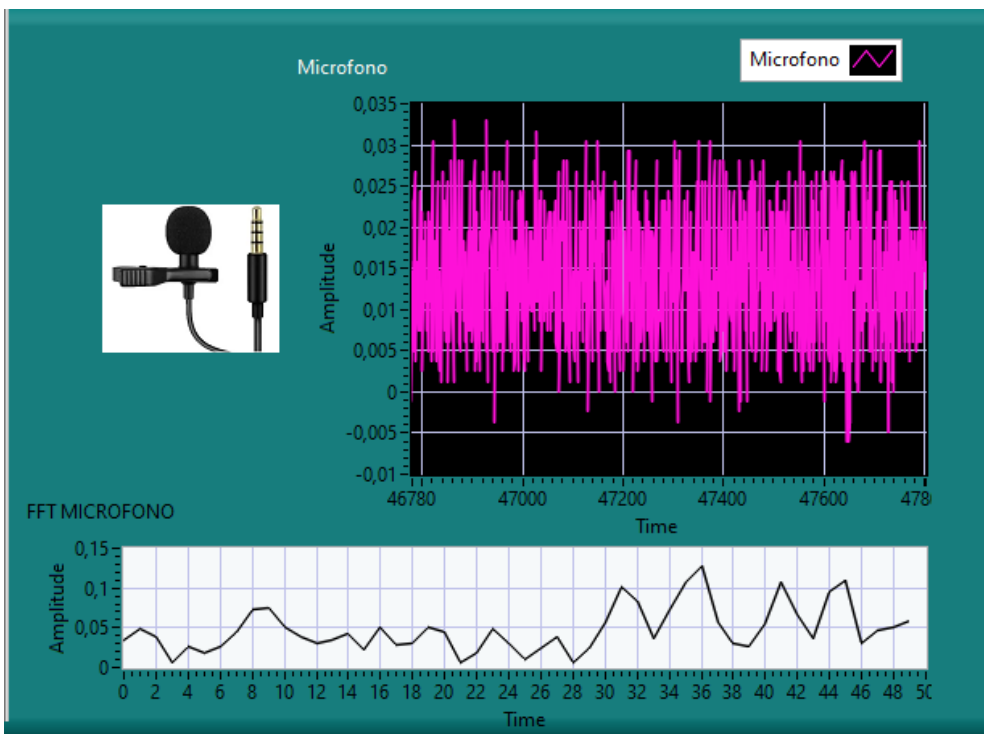


Ilustración 42. Vibraciones sin Hélices, solo motor (Micrófono)

## Resumen


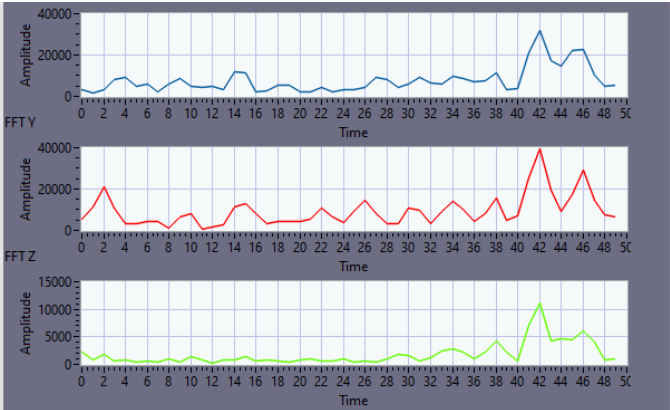

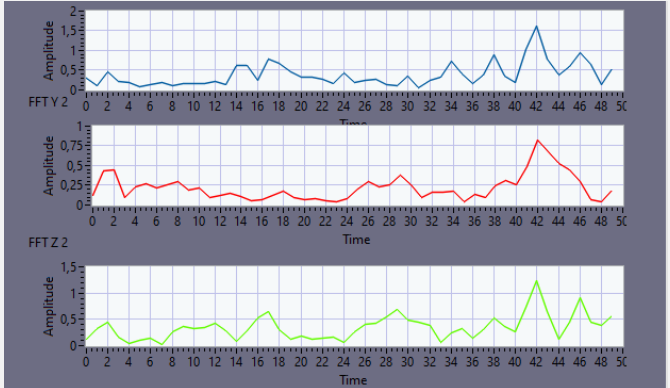

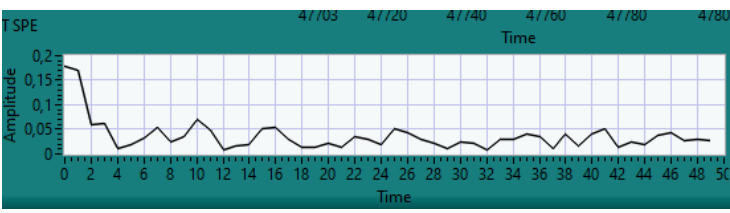

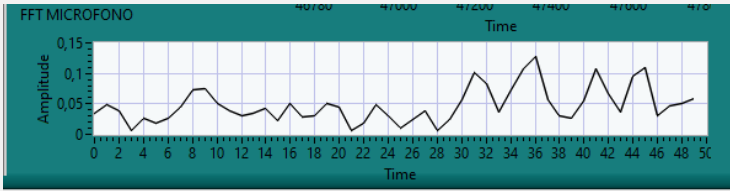
<p><b>Acelerómetro Externo MPU-6050</b></p> 	
<p><b>Acelerómetro MyRIO</b></p> 	
<p><b>Sensor de vibración piezoeléctrico</b></p> 	
<p><b>Micrófono</b></p> 	

Tabla 1. Resumen vibraciones sin Hélice

Vibraciones Hélice en buen estado:

### Acelerómetro Externo MPU-6050

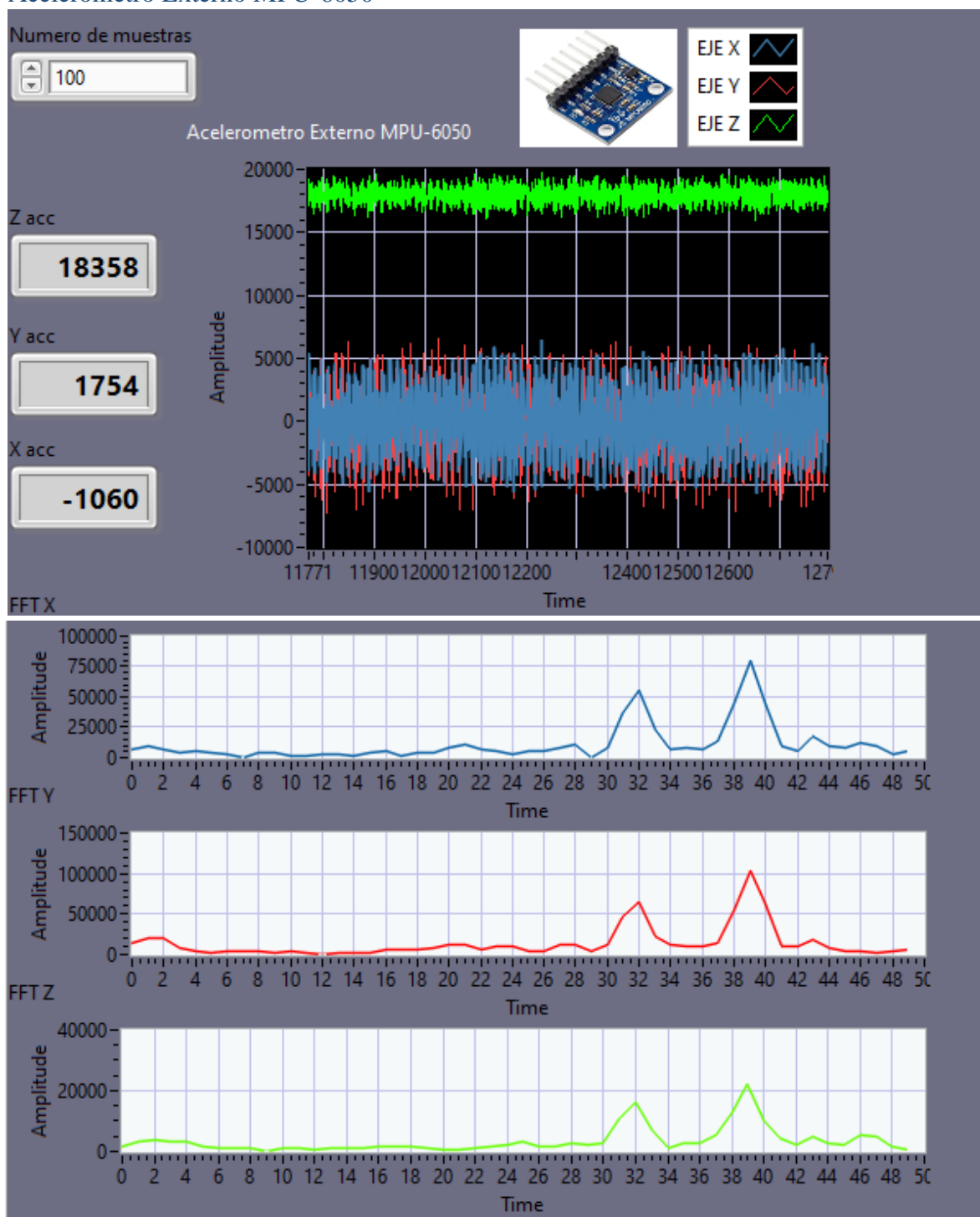


Ilustración 43. Vibraciones Hélice en buen estado (acelerómetro MPU-6050)

## Acelerómetro MyRIO

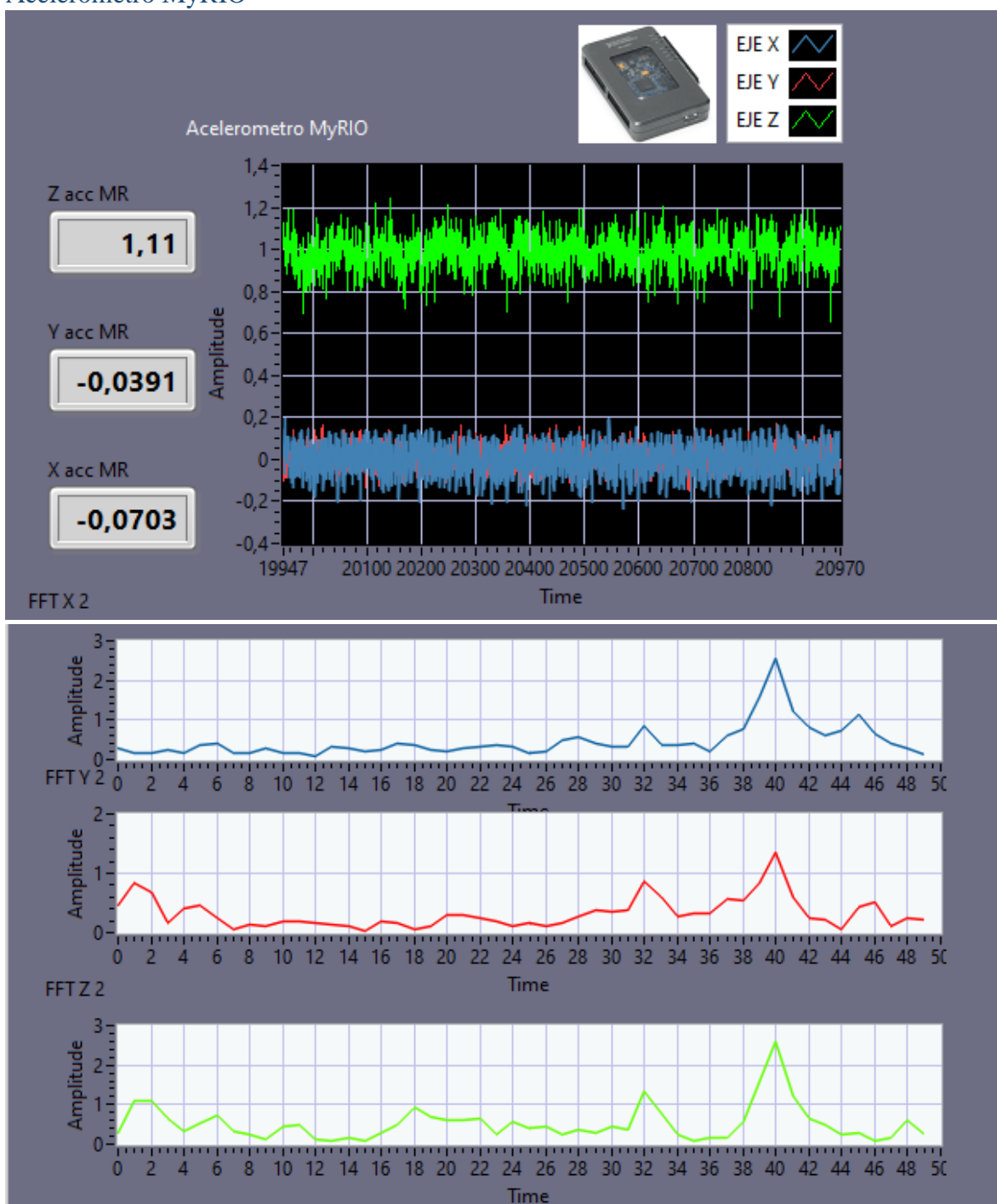


Ilustración 44. Vibraciones Hélice en buen estado (acelerómetro MyRIO)

## Sensor de Vibración Piezoeléctrico

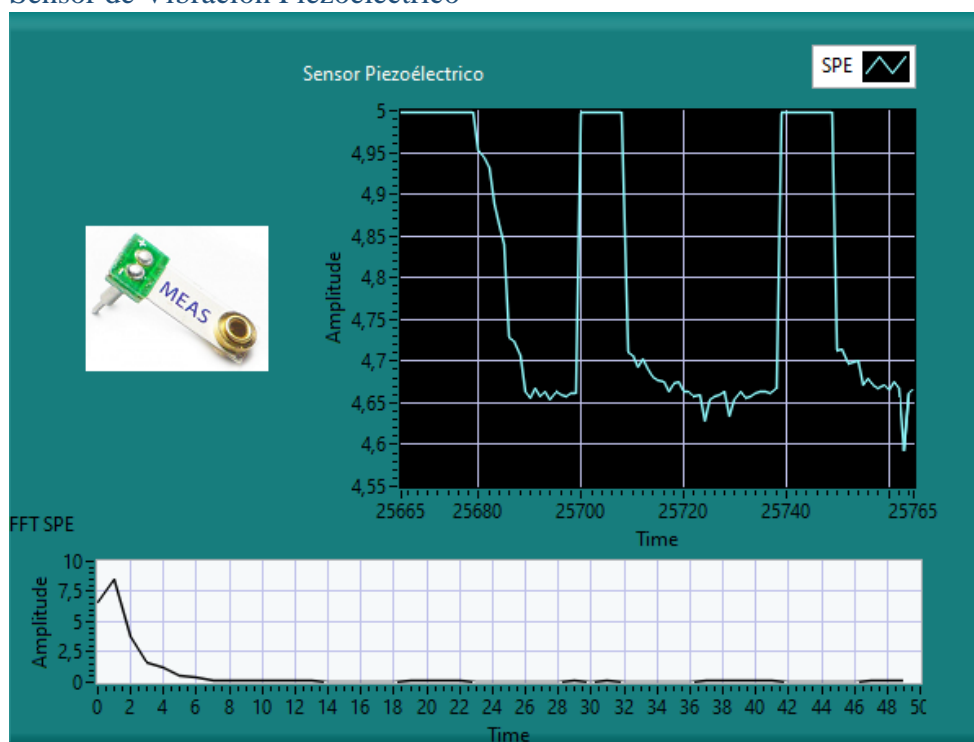


Ilustración 45. Vibraciones Hélice en buen estado (sensor piezoeléctrico)

## Micrófono

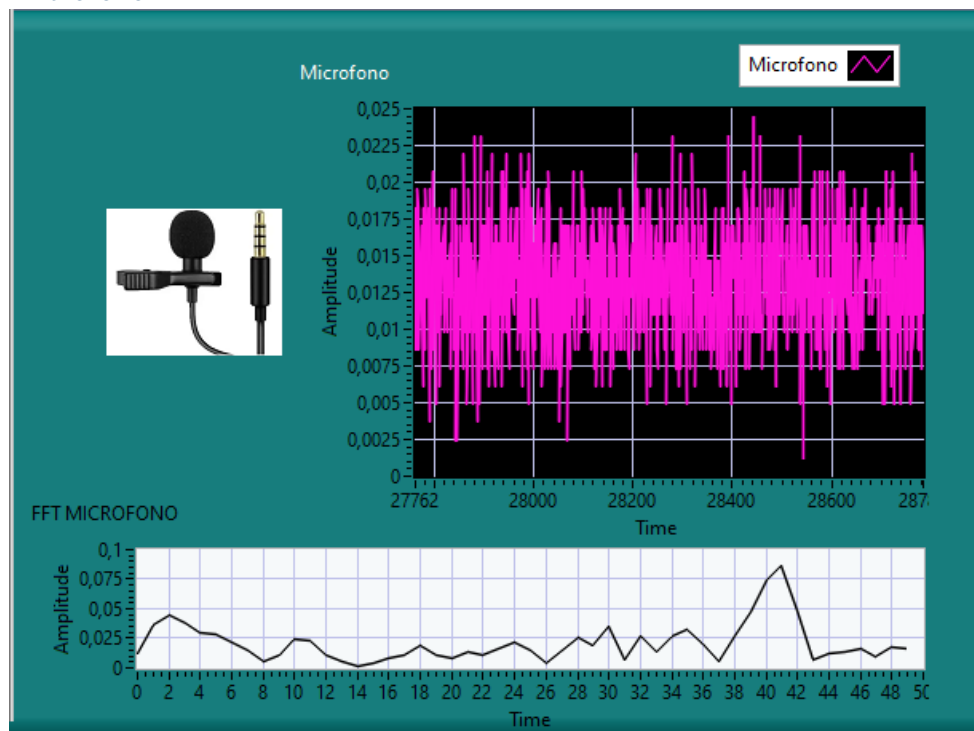


Ilustración 46. Vibraciones Hélice en buen estado (Micrófono)

## Resumen


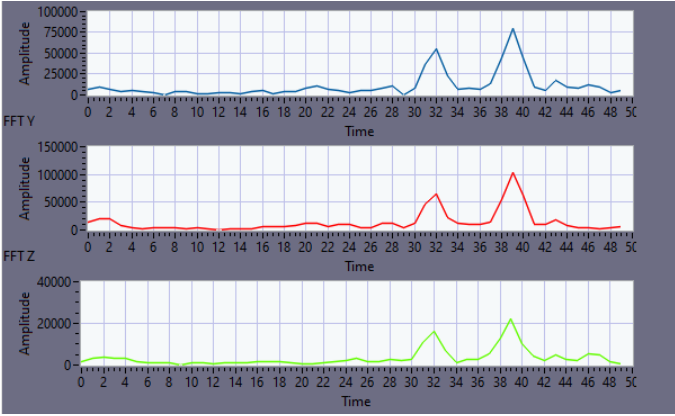

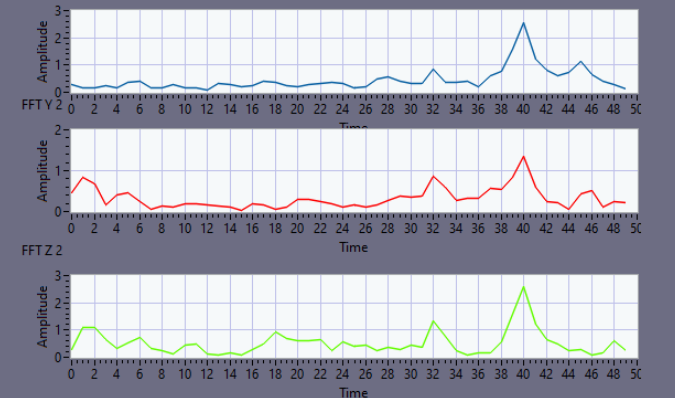

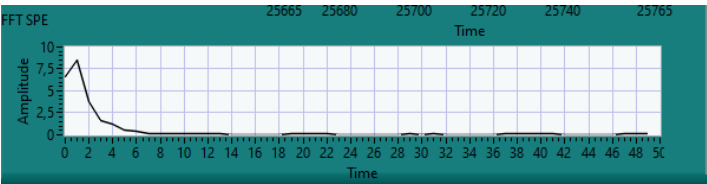

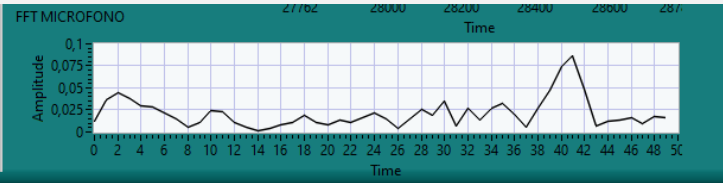
<p><b>Acelerómetro Externo MPU-6050</b></p> 	
<p><b>Acelerómetro MyRIO</b></p> 	
<p><b>Sensor de vibración piezoeléctrico</b></p> 	
<p><b>Micrófono</b></p> 	

Tabla 2. Resumen vibraciones con Hélice en buen estado

## Vibraciones Hélice Fisurada:

### Acelerómetro Externo MPU-6050

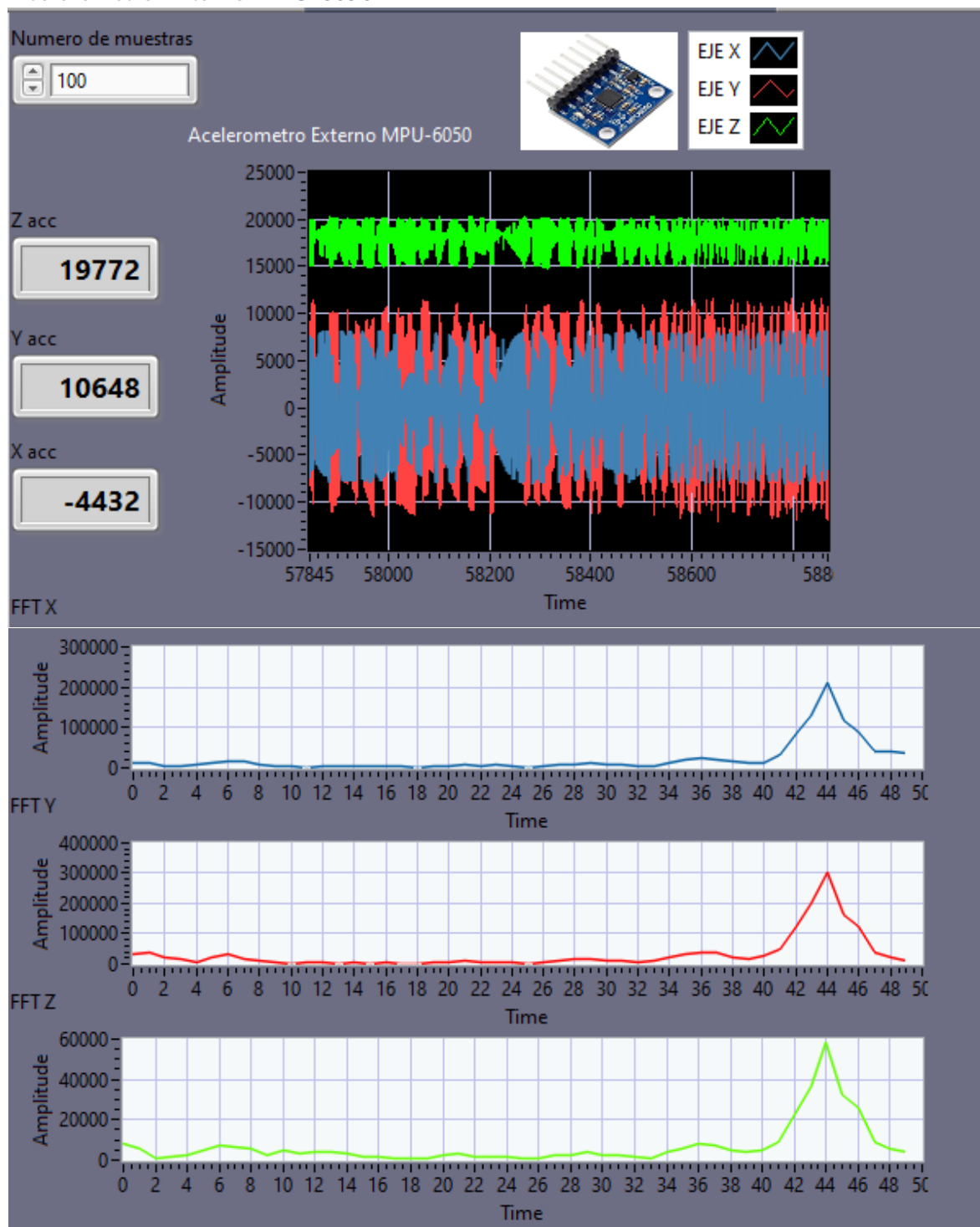


Ilustración 47. Vibraciones hélice fisurada (acelerómetro MPU-6050)

## Acelerómetro MyRIO

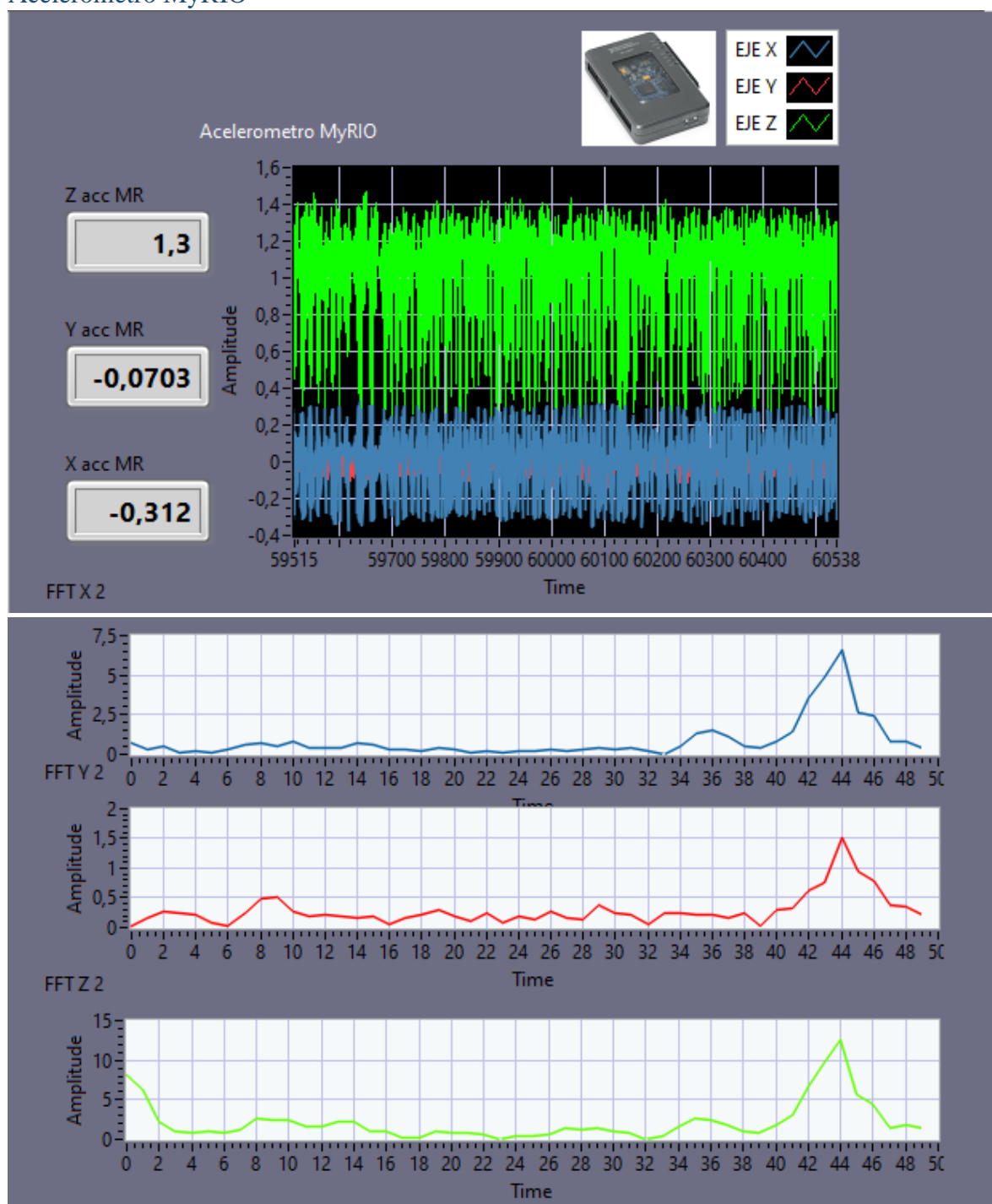


Ilustración 48. Vibraciones hélice fisurada (acelerómetro MyRIO)



## Sensor de vibración piezoeléctrico

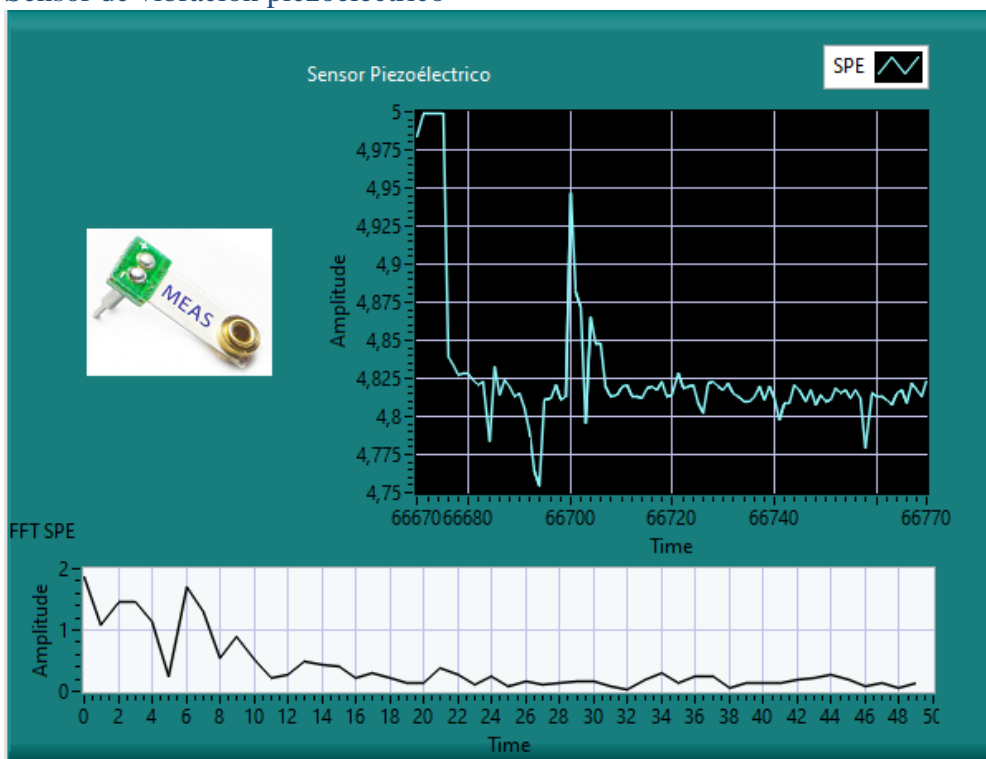


Ilustración 49. Vibraciones hélice fisurada (sensor piezoeléctrico)

## Microfófono

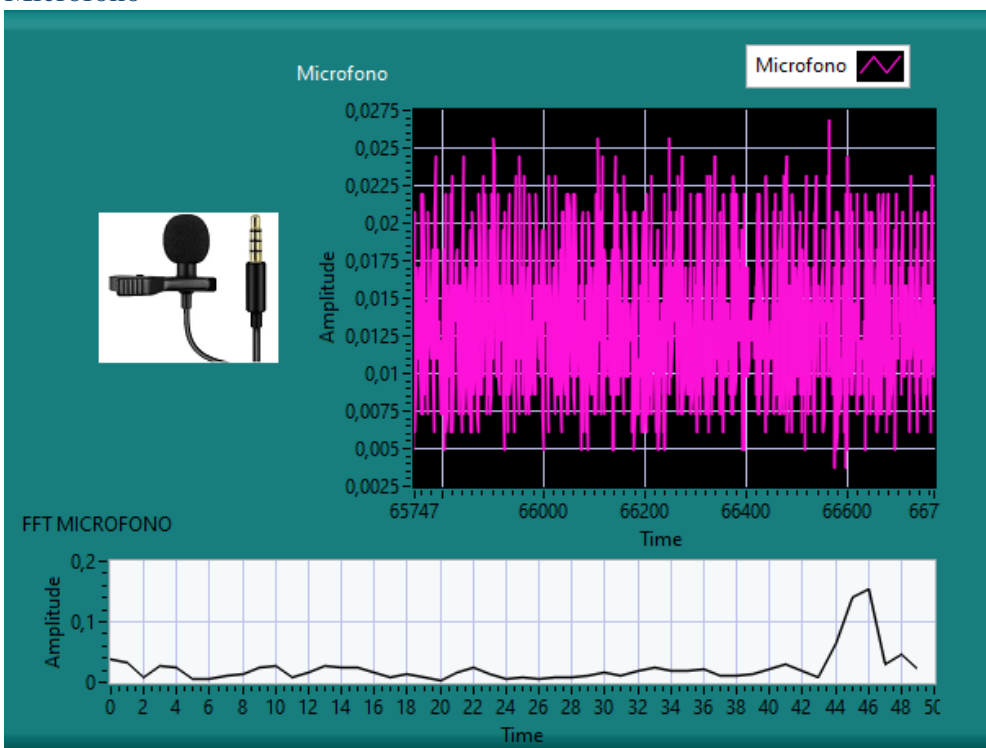


Ilustración 50. Vibraciones hélice fisurada (Microfófono)

## Resumen


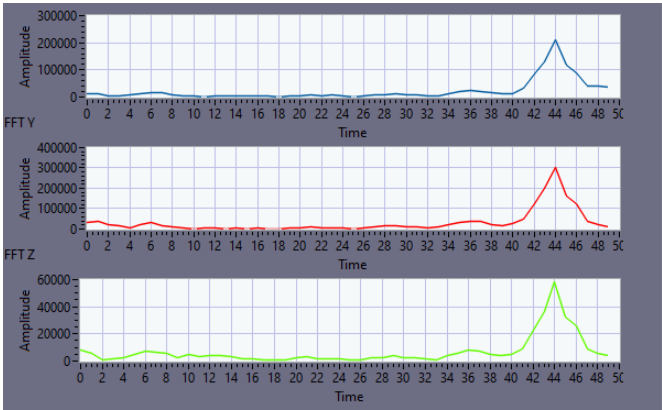

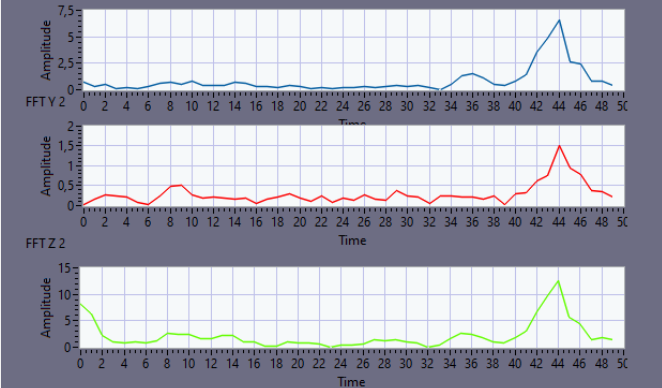

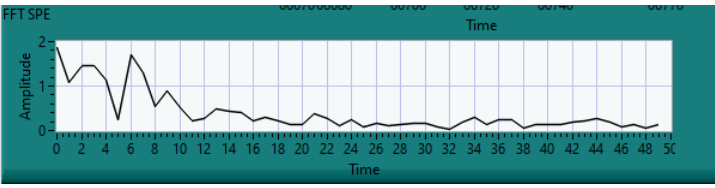

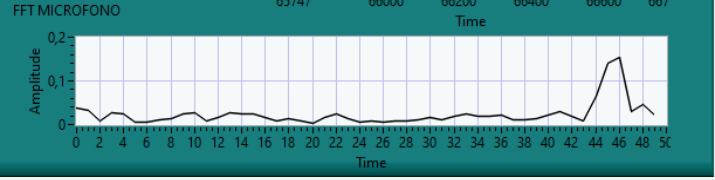
<p><b>Acelerómetro Externo MPU-6050</b></p> 	
<p><b>Acelerómetro MyRIO</b></p> 	
<p><b>Sensor de vibración piezoeléctrico</b></p> 	
<p><b>Micrófono</b></p> 	

Tabla 3. Resumen vibraciones con Hélice fisurada

Vibraciones hélice sin un aspa:

### Acelerómetro Externo MPU-6050

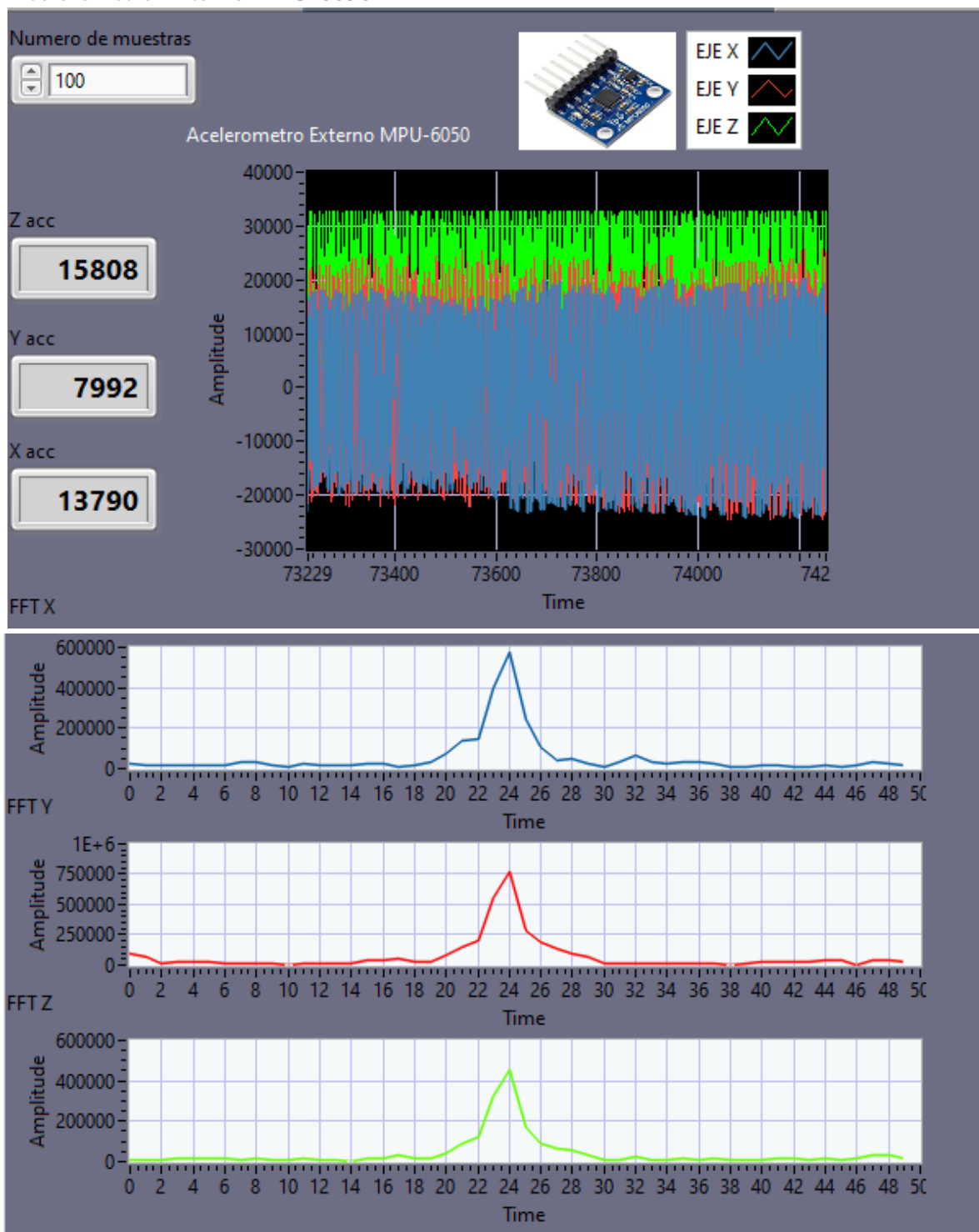


Ilustración 51. Vibraciones Hélice sin un aspa (acelerómetro MPU-6050)

## Acelerómetro MyRIO

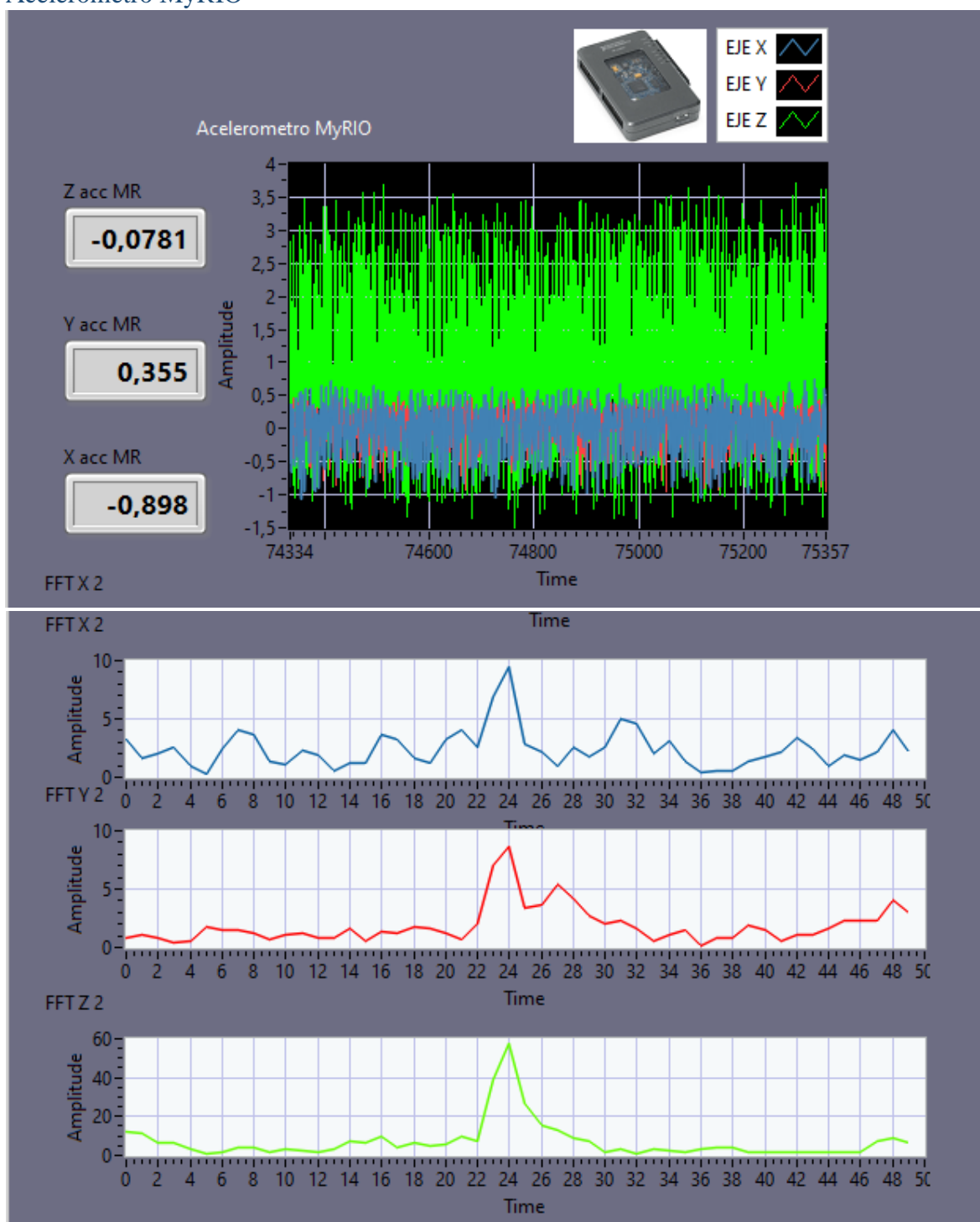


Ilustración 52. Vibraciones Hélice sin un aspa (acelerómetro MyRIO)

## Sensor de Vibración Piezoeléctrico

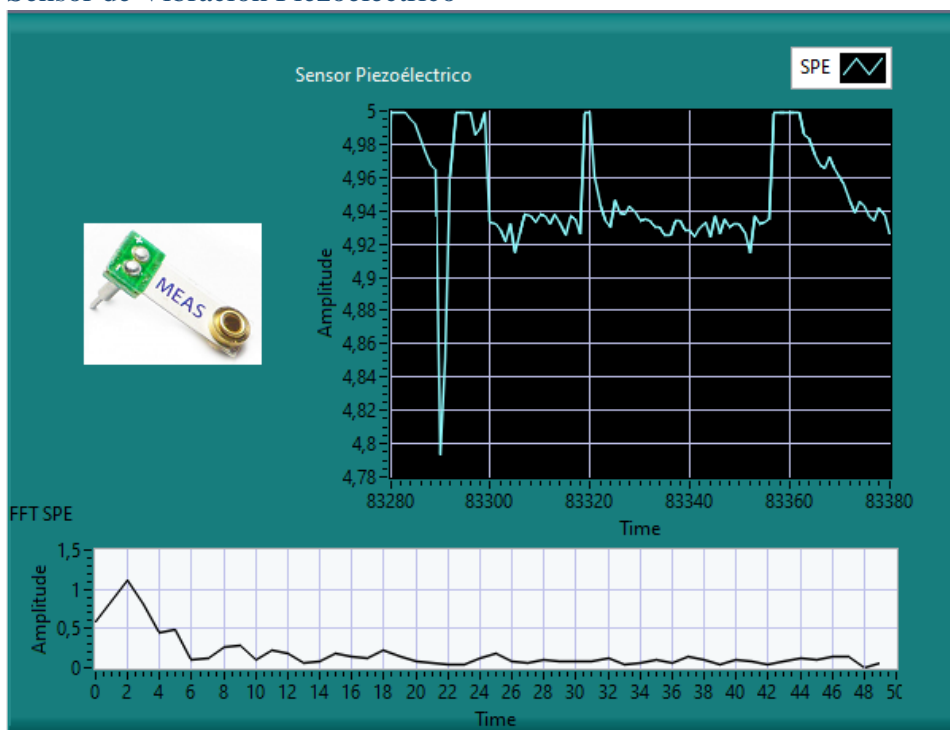


Ilustración 53. Vibraciones Hélice sin un aspa (sensor piezoeléctrico)

## Microfófono

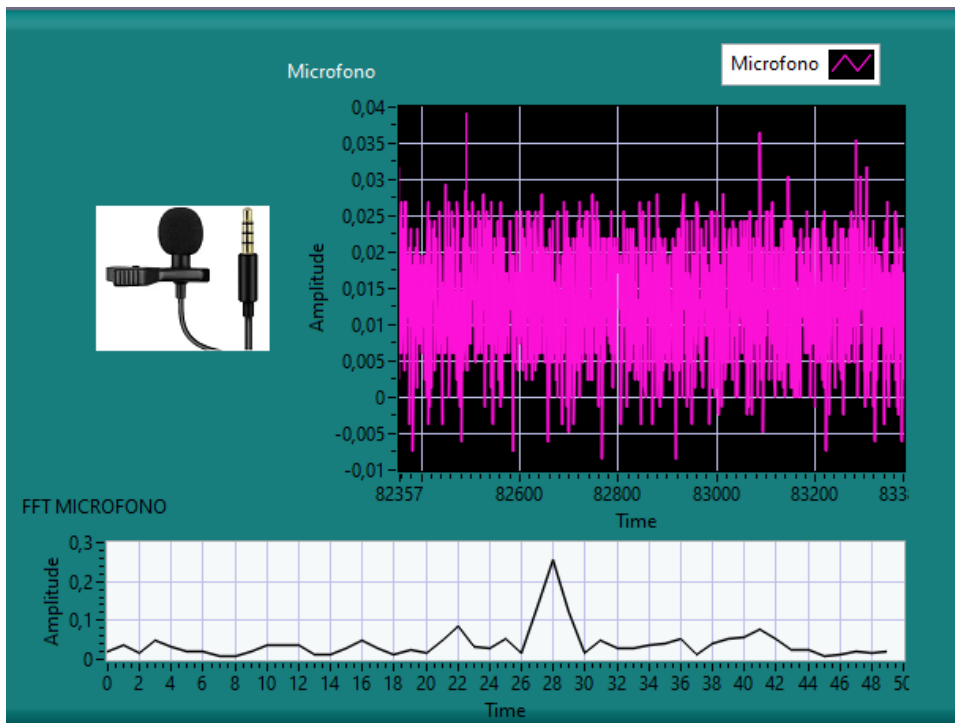


Ilustración 54. Vibraciones Hélice sin un aspa (Microfófono)

## Resumen


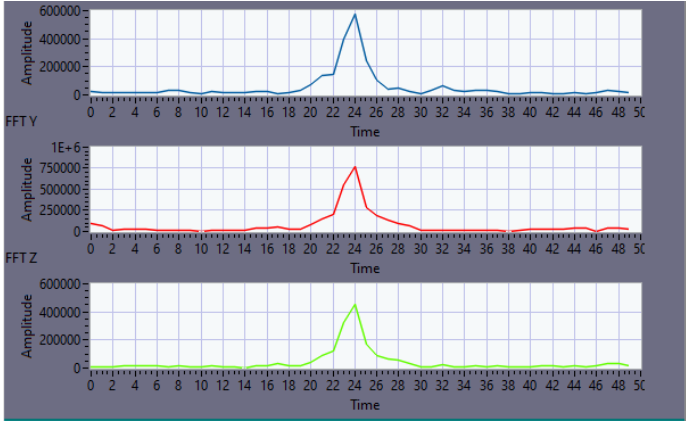

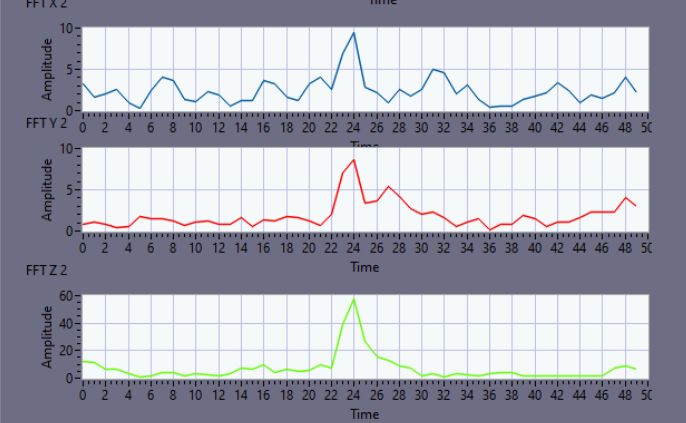

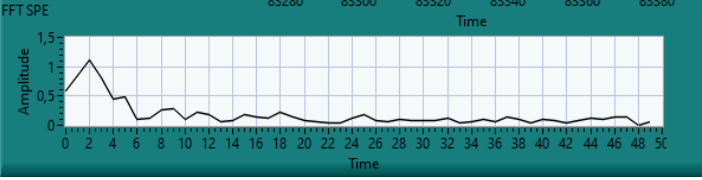

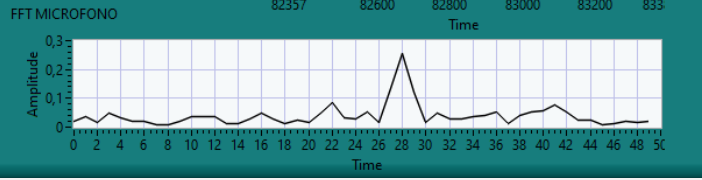


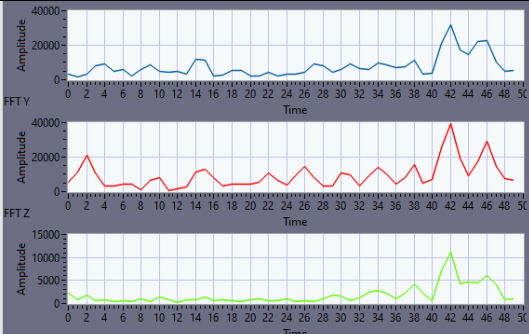

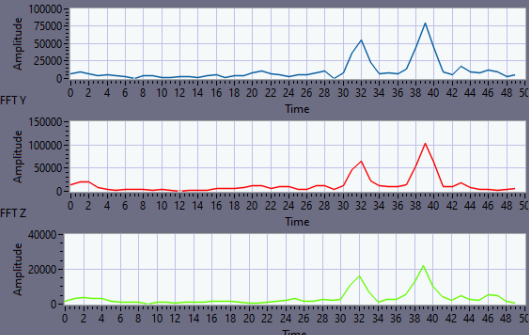

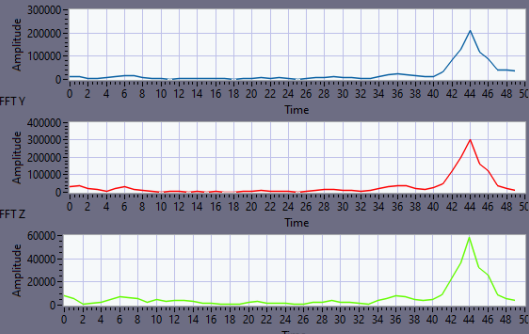
<p><b>Acelerómetro Externo MPU-6050</b></p> 	
<p><b>Acelerómetro MyRIO</b></p> 	
<p><b>Sensor de vibración piezoeléctrico</b></p> 	
<p><b>Micrófono</b></p> 	

Tabla 4. Resumen vibraciones con Hélice sin un aspa

## Análisis de Resultados

### Acelerómetro Externo MPU-6050

		
<p>Solo Motor</p> 		
<p>Hélice en correcto estado</p> 		
<p>Hélice fisurada en una de sus aspas</p> 		

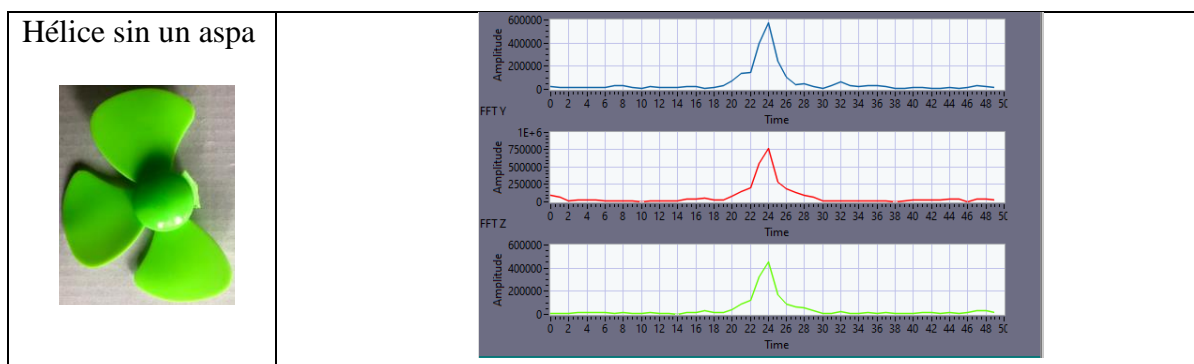


Tabla 5. Análisis de resultados acelerómetro MPU-6050

El acelerómetro externo posee una gran precisión esto debido a que este acoplado directamente al motor captando las vibraciones más pequeñas producidas por el motor, en general los tres ejes (X, Y, Z) tienen picos de tiempo en los mismos armónicos y después de realizar un análisis detallado en cada uno de los escenarios obtuvimos los siguientes resultados:

SOLO MOTOR	HÉLICE EN CORRECTO ESTADO	HÉLICE FISURADA EN UNA DE SUS ASPAS	HÉLICE SIN UN ASPA
Pico en armónico de frecuencia 42	Pico en armónico de frecuencia 39	Pico en armónico de frecuencia 44	Pico en armónico de frecuencia 24

Tabla 6. Resultados acelerómetro MPU-6050

Podemos observar que en cada escenario se generan picos diferentes los cuales indican funcionamientos anómalos en la máquina rotativa.



# Acelerómetro MyRIO



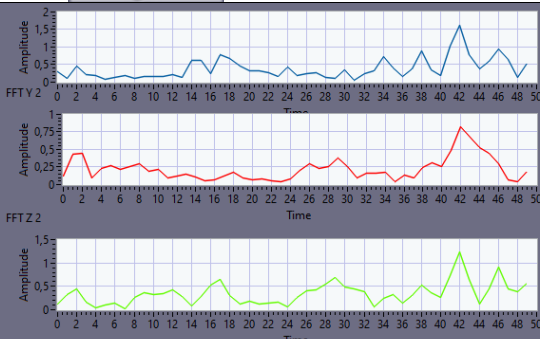

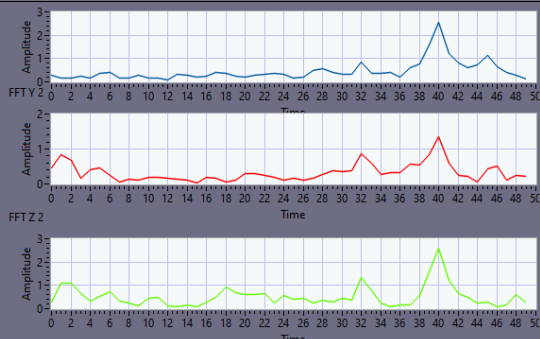

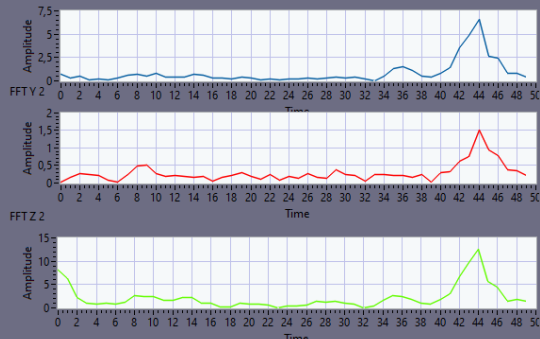

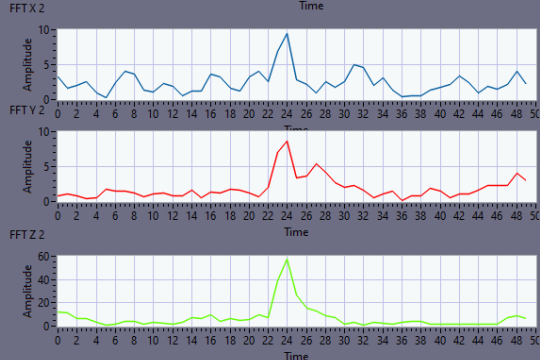
			
Solo Motor		 	
Hélice en correcto estado		 	
Hélice fisurada en una de sus aspas		 	
Hélice sin un aspa		 	

Tabla 7. Análisis de resultados acelerómetro MyRIO

El acelerómetro externo posee una gran precisión esto debido a que esta acoplado directamente al motor captando las vibraciones más pequeñas producidas por el motor, en general los tres ejes (X,Y,Z) tienen picos de tiempo en los mismos armónicos y después de realizar un análisis detallados en cada uno de los escenarios obtuvimos los siguientes resultados:

SOLO MOTOR	HÉLICE EN CORRECTO ESTADO	HÉLICE FISURADA EN UNA DE SUS ASPAS	HÉLICE SIN UN ASPA
Pico en armónico de frecuencia 42	Pico en armónico de frecuencia 40	Pico en armónico de frecuencia 44	Pico en armónico de frecuencia 24

*Tabla 8. Resultados acelerómetro MyRIO*

Podemos observar que en cada escenario se generan picos diferentes los cuales indican funcionamientos anómalos en la máquina rotativa

## Sensor de vibración piezoeléctrico



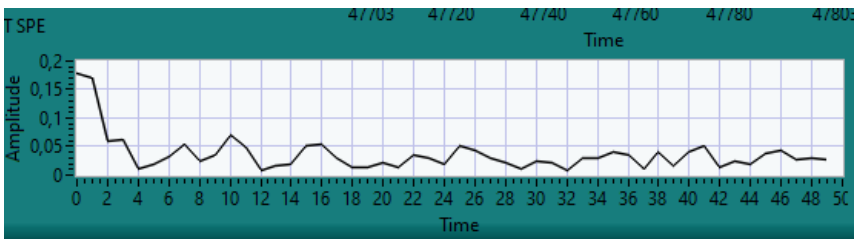

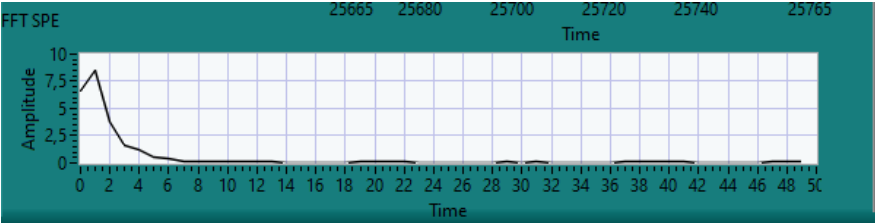

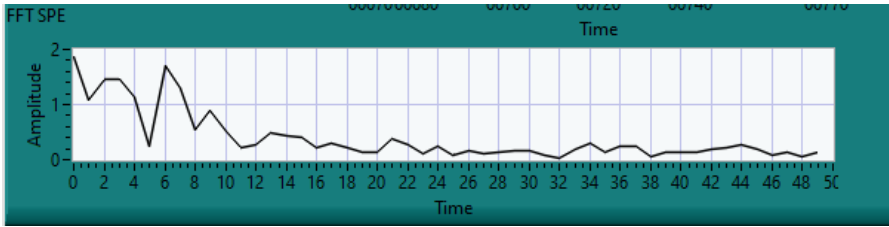

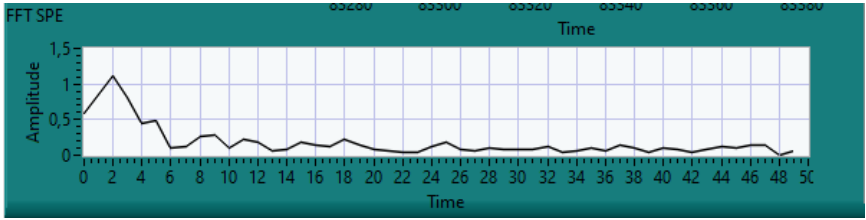
	
<p>Solo Motor</p> 	
<p>Hélice en correcto estado</p> 	
<p>Hélice fisurada en una de sus aspas</p> 	
<p>Hélice sin un aspa</p> 	

Tabla 9. Análisis de resultados acelerómetro sensor piezoeléctrico

SOLO MOTOR	HÉLICE EN CORRECTO ESTADO	HÉLICE FISURADA EN UNA DE SUS ASPAS	HÉLICE SIN UN ASPA
Pico en armónico de frecuencia 0,0 – 0,8	Pico en armónico de frecuencia 0,6	Pico en armónico de frecuencia 6	Pico en armónico de frecuencia 2

*Tabla 10. Resultados acelerómetro sensor piezoeléctrico*

En el caso del sensor piezoeléctrico se evidencia que solo se adquiere señal de 1 eje y no adquiere datos de vibración adicionales que pueden llegar a dar un diagnóstico preciso.

## Micrófono



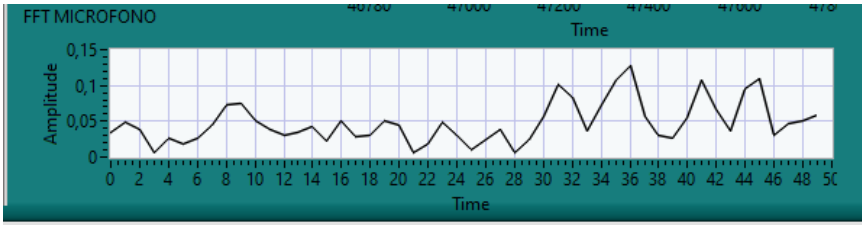

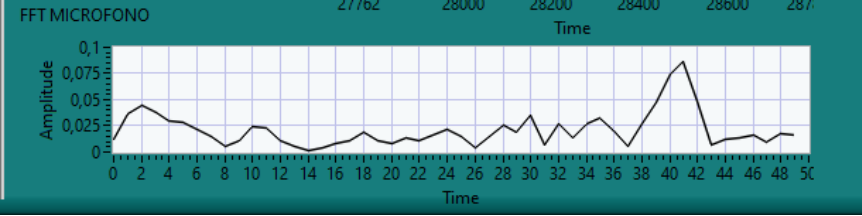

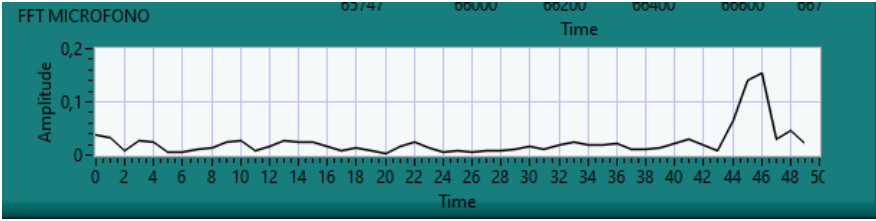

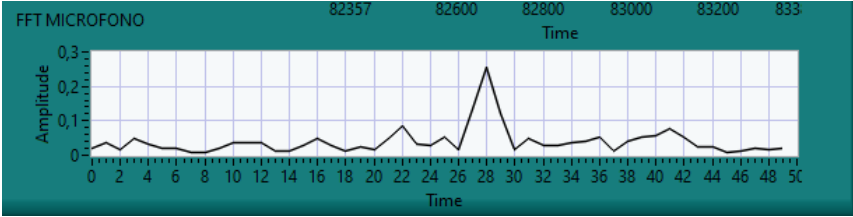
	
<p>Solo Motor</p> 	
<p>Hélice en correcto estado</p> 	
<p>Hélice fisurada en una de sus aspas</p> 	
<p>Hélice sin un aspa</p> 	

Tabla 11. Análisis de resultados acelerómetro Micrófono

SOLO MOTOR	HÉLICE EN CORRECTO ESTADO	HÉLICE FISURADA EN UNA DE SUS ASPAS	HÉLICE SIN UN ASPA
Pico en armónico de frecuencia 36	Pico en armónico de frecuencia 41	Pico en armónico de frecuencia 6	Pico en armónico de frecuencia 28

*Tabla 12. Resultados acelerómetro Micrófono*

Se evidencia con el micrófono una correcta detección de averías ya que las frecuencias sonoras generadas por la maquina rotativa permiten tratar la señal e identificar comportamientos anómalos.

## Conclusiones

Los acelerómetros poseen una mayor precisión al identificar fallas en motores ya que como pudimos comprobar al adquirir datos de los ejes X, Y, Z tenemos la información suficiente para detectar pequeños cambios en vibraciones.

Los acelerómetros que están ubicados en una misma base que el motor captan cambios en vibraciones y posibilitan la detección de fallas sin embargo cuando el sensor este acoplado directamente al motor se tiene una precisión aún mayor.

Es necesario tener una correcta caracterización del motor previo a la identificación de fallas para poder identificar cambios en la identificación de fallas.

El sensor piezoeléctrico puede detectar cambios en vibraciones en un solo eje lo cual nos es eficiente para la detección de fallas.

La detección de fallas a través del sonido con adquisición por micrófono es una alternativa eficiente ya que en los momentos iniciales de las fallas se generan picos de sonido anómalos.

Implementar acelerómetros a las carcasas de los motores es una forma eficiente de realizar mantenimientos predictivos evitando pérdida de información optimizando recursos humanos y ahorrando costos de reparación.

La plataforma desarrollada posibilita el aprendizaje en temáticas básicas como digitales, electrónica analógica, instrumentación y medición y procesamiento digital y analógico de señales.

## **Bibliografía**

W. Olarte, M Botero, B Cañón (2010). Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria

G. White (2010). Introducción al Análisis de Vibraciones

Santos, M.Piedra (1990). Experiencias con el sistema para el procesamiento de señales vibroacústicas

T. Thomson (1998) Vibration Random Data. Theory and Applications.London

G. Mosquera (2000) Las vibraciones mecánicas y su aplicación en el mantenimiento predictivo